



TUGAS AKHIR - TM142501

# PENGARUH PENEROLAN DINGIN DAN PENGELASAN GTAW TERHADAP KERENTANAN KOROSI BATAS BUTIR BAJA AISI 316L

GALIH NUGROHO  
NRP 2114 105 025

Dosen Pembimbing  
Suwarno, ST., MSc., Ph.D

JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017





TUGAS AKHIR - TM142501

# **PENGARUH PENEROLAN DINGIN DAN PENGELASAN GTAW TERHADAP KERENTANAN KOROSI BATAS BUTIR BAJA AISI 316L**

**GALIH NUGROHO**  
NRP 2114 105 025

Dosen Pembimbing  
Suwarno, ST., MSc., Ph.D

JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017





FINAL PROJECT - TM142501

# THE INFLUENCE OF COLD ROLLING AND GTAW WELDING TOWARD THE VULNERABILITY INTERGRANULAR CORROSION OF AISI 316L STEEL

GALIH NUGROHO  
NRP 2114 105 025

Advisor  
Suwarno, ST., MSc., Ph.D

Mechanical Engineering Department  
Industrial Technology Faculty  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2017



## LEMBAR PENGESAHAN

### PENGARUH Pengerolan Dingin dan Pengelasan GTAW Terhadap Kerentanan Korosi Batas Butir Baja AISI 316L

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**GALIH NUGROHO**

NRP. 2114 105 025

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. **Suwarno, ST., MSc., Ph.D** ..... (Pembimbing)  
NIP. 198005202005011003
2. **Indra Sidharta, ST., MSc.** ..... (Penguji 1)  
NIP. 198006192006041004
3. **Wahyu Wijanarko, ST., MSc.** ..... (Penguji 2)  
NIP. 198202092012121001
4. **Ir. Hari Subivanto, MSc.** ..... (Penguji 3)  
NIP. 196006231988031002

**SURABAYA**

**Januari 2017**

# **PENGARUH Pengerolan Dingin dan Pengelasan GTAW Terhadap Kerentanan Korosi Batas Butir Baja AISI 316 L**

**Nama Mahasiswa** : Galih Nugroho  
**NRP** : 2114105025  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Pembimbing** : Suwarno, S.T. M.Sc. Ph.D

## **ABSTRAK**

*Stainless steel 316 L adalah suatu logam paduan yang mempunyai sifat tahan korosi yang baik sehingga banyak dipakai didunia industri. Permasalahan yang sering timbul adalah ketika melakukan proses pengelasan, dimana pada saat mencapai temperatur 500°C – 680°C pada Stainless Steel tipe 316L akan mengakibatkan terbentuknya presipitasi karbida chrom pada batas butir. Sehingga daerah sekitar batas butir mengalami depletion chrom, atau miskin kromium yaitu kurang dari 12% sebagai syarat baja menjadi tahan terhadap korosi. Apabila berada pada lingkungan korosif cenderung terjadi korosi batas butir (intergranular corrosion). Derajat Pengerjaan dingin dan temperatur operasi dari suatu logam dapat mempengaruhi sifat mekanik dan juga ketahanannya terhadap korosi. Pada umumnya pengerjaan dingin dapat memperbaiki sifat mekanik yaitu kekuatan dan ketahanan lelah. Namun, logam tersebut akan semakin peka terhadap korosi.*

*Penelitian dilakukan untuk mengamati pengaruh parameter proses, diantaranya besar prosentase reduksi pada pengerolan dingin dengan variasi reduksi 20%, 40%, 60%, lama waktu pengelasan yaitu 5 detik, 10 detik dan besar arus pengelasan dengan variasi arus sebesar 50, 60, 80A terhadap struktur mikro, dan laju korosi pada material yang dilas dengan menggunakan las GTAW. Material yang digunakan adalah stainless steel 316 L.*



*Pengelasan dilakukan dengan mesin las GTAW, alat uji laju korosi sel tiga elektroda dengan bantuan software NOVA 1.8, sedangkan pengamatan struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optic. Dari penelitian ini diketahui bahwa stuktur mikro sangat berpengaruh terhadap ketahanan korosi batas butir dari austenit stainless steel dalam hal ini yaitu AISI 316L. Pada spesimen yang mengalami perlakuan dingin dalam hal ini pengerolan dingin dan perlakuan panas dalam hal ini adalah pengelasan maka tampak struktur mikro terbentuk twin-boundary yang lebih tahan terhadap korosi intergranular. Dilihat dari hasil pengujian Icorr dengan potensiostat didapatkan, laju korosi terendah saat pengelasan 5 detik terjadi sewaktu pengerolan dingin dengan reduksi sebesar 40% disaat pengelasan menggunakan arus sebesar 50 amper yaitu 0,001 mm/year, sedangkan laju korosi terendah saat pengelasan 10 detik didapatkan laju korosi terendah saat pengerolan dingin dilakukan sebesar 40% dan 60% dengan pengelasan menggunakan arus sebesar 65 amper yaitu sebesar 0,001 mm/year.*

*Kata kunci: las GTAW, cold rolling , laju korosi, potensiostat, stainless steel 316 L*

# **THE INFLUENCE OF COLD ROLLING AND GTAW WELDING TOWARDS THE VULNERABILITY INTERGRANULAR CORROSION OF AISI 316L STEEL**

**Name** : Galih Nugroho  
**NRP** : 2114105025  
**Departemen** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Advisor** : Suwarno, S.T. M.Sc. Ph.D

## **ABSTRACT**

*316L stainless steel is a mixed-metal that has good corrosion resistance that is widely used in the world of industry. The common problem that appears is when doing the welding process, when the temperature reached 500°C-680 °C in 316L stainless steel, it will make the formation of chromium carbide precipitation at grain boundaries. So, the grain boundaries' area runs into depletion chrom, or has chromium less than 12% as a requirement of the corrosion resistant steel. In corrosive environments, it tends to occur the corrosion of grain boundaries (Intergranular Corrosion). The cold process degrees and the operating temperature of a metal can affect the mechanical characteristic and the resistance of corrosion. In general, cold process can fix the mechanical characteristics; they are the strength and bushed resistance. However, these metals will be more sensitive to corrosion.*

*The research was conducted to investigate the effect of process parameters, such as the percentage of reduction in the cold rolling with variation reduction of 20%, 40%, 60%, the duration welding time is 5 second, 10 second and the current of welding process is 50A, 65A, 80A towards microstructure, and the corrosion rate of materials that have welded using GTAW welding machines. The material used is 316L stainless steel. The welding process is done by GTAW welding machine, rate instrument test of three-electrode cell*

*corrosion with software NOVA 1.8, meanwhile the microstructure observation used an optical microscope.*

*From this research it is known that the micro structure affects the corrosion resistance of the grain boundary austenite stainless steel in this case is AISI 316L. In specimens that undergo cold prlakuan in this case the cold rolling and heat treatment in this case is welding it seemed microstructure formed twin-boundary that is more resistant to intergranular corrosion. From the calculation Icorr with potensiostate, the corrosion rate of the lowest corrosion rate obtained while welding 5 seconds occur during cold rolling carried reduction of 40% when using a welding current of 65 amperes is 0.001 mm / year, while the lowest corrosion rate obtained while welding 10 seconds when the lowest corrosion rate cold rolling is done by 40% and 60% by using a welding current of 50 amperes is equal to 0.001 mm / year.*

*Keywords: GTAW welding, cold rolling, corrosion rate, potentiostat, 316L stainless steel.*

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT. Karena atas rahmat dan hidayah-Nya, proposal tugas akhir yang berjudul *"PENGARUH Pengerolan Dingin dan Pengelasan GTAW Terhadap Kerentanan Korosi Batas Butir Baja AISI 316L"* ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik dan lancar.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi oleh setiap mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin ITS Surabaya, sesuai dengan kurikulum yang telah ditetapkan. Selain itu Tugas Akhir ini juga merupakan suatu bukti yang diberikan almamater dan masyarakat.

Banyak dorongan dan bantuan yang penulis dapatkan selama penyusunan Tugas Akhir ini sampai terselesaikannya laporan. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT dan junjungan besar Nabi Muhammad SAW.
2. Ayah, Ibu, dan adik tercinta yang memberikan semangat dengan cinta dan kasih sayangnya yang tiada batas,serta doa dan restunya.
3. Suwarno, ST., MSc., Ph.D sebagai Dosen Pembimbing yang telah dengan sangat sabar, tidak bosan-bosannya membantu dan memberikan ide serta ilmu hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
4. Dosen tim penguji yang telah memberikan kritik dan saran dalam penyempurnaan dan pengembangan Tugas Akhir ini.
5. Seluruh dosen dan staf pengajar Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, yang telah memberikan ilmunya dan membantu semua selama menimba ilmu di bangku kuliah.
6. Seluruh keluarga laboratorium teknik metalurgi yang telah menyediakan tempat dan telah memberikan bantuan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
7. Niko Arianto selaku teman seperjuangan tugas akhir.
8. Seluruh keluarga kontrakan MM-47

9. Seluruh keluarga Lintas Jalur Teknik Mesin. Mari sukses bersama.

Semoga segala keikhlasan dan kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang terbaik dari Tuhan Yang Maha Esa, Amin.

Karena keterbatasan waktu dan kemampuan penulis, sebagai manusia biasa kami menyadari dalam penulisan ini masih terdapat beberapa kesalahan dan kekurangan. Oleh karena itu, kami mengharap kritik dan saran membangun sebagai masukan untuk penulis dan kesempurnaan Tugas Akhir ini. Semoga dengan penulisan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan, mahasiswa Mesin pada khususnya.

Surabaya, Januari 2017

Galih Nugroho

## DAFTAR ISI

hal.	
<b>Judul Tugas Akhir .....</b>	<b>i</b>
<b><i>Title of Final Project .....</i></b>	<b>ii</b>
<b>Lembar Pengesahan .....</b>	<b>iii</b>
<b>Abstrak .....</b>	<b>iv</b>
<b><i>Abstract .....</i></b>	<b>vi</b>
<b>Kata Pengantar .....</b>	<b>vii</b>
<b>Daftar Isi .....</b>	<b>ix</b>
<b>Daftar Gambar .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Daftar Tabel .....</b>	<b>xiv</b>
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Batasan Masalah .....	3
1.4. Tujuan Penelitian .....	3
1.5. Manfaat Penelitian .....	4
1.6. Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1. Struktur Kristal Dan Deformasi .....	5
2.1.1. Struktur Kristal .....	5
2.1.2. Deformasi Twinning .....	6
2.2. Pengaruh Pengerjaan Dingin .....	7
2.2.1. <i>Cold Rolling</i> .....	8
2.3. Klasifikasi Baja Tahan Karat .....	9
2.3.1. Baja Tahan Karat Austenitik .....	10
2.3.2. Unsur Paduan Baja Tahan Karat Austenitik .....	11
2.4. Korosi .....	12
2.4.1. Pengertian Korosi .....	12
2.4.2. Korosi Batas Butir .....	13
2.4.3. Mekanisme Korosi Batas Butir .....	15

2.4.4.	Pencegahan dan Kontrol Korosi Batas Butir .....	16
2.4.5.	Potensiostat .....	17
2.5.	Proses Pengelasan .....	19
2.5.1.	Input Panas.....	20
2.5.2	Daerah Pengaruh Panas.....	22
2.5.3.	Tungsten Inert Gas (TIG) Welding.....	24
2.6.	Penelitian Terdahulu.....	28
<b>BAB 3.</b>	<b>METODE PENELITIAN .....</b>	<b>29</b>
3.1.	Tahap Penelitian.....	30
3.2.	Kajian Pustaka .....	32
3.3.	Spesimen Uji.....	32
3.4.	Proses <i>Grinding</i> dan <i>Polishing</i> .....	32
3.5.	Proses Etsa ( <i>Etching</i> ) .....	33
3.6.	Proses Pengamatan Struktur Mikro.....	34
3.7.	Proses Pengerolan Dingin .....	35
3.8.	Proses Las GTAW .....	36
3.9.	Proses Pengujian Laju Korosi .....	36
3.10.	Rancangan Eksperimen.....	39
<b>BAB 4.</b>	<b>HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>41</b>
4.1.	Hasil Pengujian Komposisi Kimia .....	41
4.2.	Hasil Dari Pengerolan Dingin.....	42
4.3.	Pengamatan Struktur Mikro.....	42
4.3.1.	Pengamatan Mikroskop Optik.....	42
4.4.	Pengamatan Struktur Makro .....	44
4.5.	Laju Korosi .....	47
4.5.1.	Perhitungan Icorr Pada HAZ.....	49
4.5.2.	Perhitungan Laju Korosi Pada HAZ .....	53
4.6	Pengaruh Pengerjaan Dingin (Cold Roll), Besar Arus Pengelasan, Lama waktu Pengelasan Terhadap Kerentanan Korosi Batas Butir SS 316L .....	54
4.6.1.	Analisa Pengaruh Cold Roll Dengan Waktu Pengelasan 5 detik .....	55
4.6.2.	Analisa Pengaruh Cold Roll Dengan Waktu Pengelasan 10 detik .....	56

4.7 Pengujian Statistik.....	57
<b>BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>61</b>
5.1. Kesimpulan.....	61
5.2. Saran.....	61
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>62</b>
<b>LAMPIRAN</b>	



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1.</b> Bentuk struktur kristal.....	6
<b>Gambar 2.2.</b> Twin Boundary .....	7
<b>Gambar 2.3</b> Kurva persen pengerjaan dingin terhadap kekuatan dan keuletan.....	8
<b>Gambar 2.4.</b> Pengerolan dingin.....	9
<b>Gambar 2.5.</b> (a).Mekanisme korosi batas butir (b) Hasil metalografi terjadi presipitasi karbida.....	15
<b>Gambar 2.6.</b> Pengaruh kadar karbon terhadap presipitasi karbida.....	15
<b>Gambar 2.7.</b> Rangkaian potensiostat dengan tiga electrode ..	18
<b>Gambar 2.8.</b> Efisiensi sumber panas pada beberapa proses las21	
<b>Gambar 2.9</b> Efek Heat Input pada Proses Pengelasan: (a) Hubungan dengan lebar HAZ: (b) Siklus Termal Dekat Batas Fusion: (c) Kekuatan dan Kekerasan yang dihasilkan.....	21
<b>Gambar 2.10..</b> Heat affected zone.....	22
<b>Gambar 2.11.</b> Grafik waktu pendinginan dan temperature....	23
<b>Gambar 2.12..</b> Daerah-daerah akibat input panas .....	23
<b>Gambar 2.13.</b> Las TIG .....	24
<b>Gambar 2.14.</b> Diagram rangkaian listrik dari mesin las listrik DC.....	25
<b>Gambar 2.15.</b> Efek dari polaritas.....	26
<b>Gambar 3.1.</b> Diagram alir proses penelitian .....	31
<b>Gambar 3.2</b> Mesin <i>Grinding</i> dan <i>Polishing</i> .....	34
<b>Gambar 3.3.</b> Proses Uji Etsa ( <i>etching</i> ).....	35
<b>Gambar 3.4.</b> Mikroskop optik.....	36
<b>Gambar 3.5.</b> Mesin Cold Roll.....	37
<b>Gambar 3.6.</b> Mesin Las GTAW.....	37
<b>Gambar 3.7.</b> Spesimen uji laju korosi.....	38
<b>Gambar 3.8.</b> (a) Alat uji potensiostat, (b) Elektroda Acuan, (b) Elektroda Pembantu ( <i>Counter Electrode</i> ).....	39

<b>Gambar 4.1</b>	Struktur mikro spesimen tanpa reduksi (a) struktur mikro sebelum pengelasan dan pengerolan (b) pengelasan dengan arus 50A selama 10detik (c) pengelasan dengan arus 80A selama 10 detik.....	43
<b>Gambar 4.2</b>	Struktur mikro spesimen dengan reduksi 60% (a)pengelasan dengan arus 50A selama 10detik (b) pengelasan dengan arus 65A selama 10 detik (c) pengelasan dengan arus 80A selama 10 detik.....	44
<b>Gambar 4.3.</b>	Struktur mikro terjadi korosi batas butir.....	44
<b>Gambar 4.4.</b>	Terjadi pembentukannya twin boundary.....	45
<b>Gambar 4.5.</b>	Grafik Polarisasi Pengujian SS 316L reduksi 60% arus 80A waktu las 5 detik.48	
<b>Gambar 4.6.</b>	Grafik Polarisasi Pengujian Laju Korosi SS 316L reduksi 40% arus 65A waktu las 5 detik.....	48
<b>Gambar 4.7.</b>	Grafik Polarisasi Pengujian Laju Korosi SS 316L reduksi 20% arus 80A waktu las 5 detik.....	49
<b>Gambar 4.8.</b>	Spesimen Uji Korosi.....	50
<b>Gambar 4.9.</b>	Efek variasi arus pengelasan terhadap laju korosi material yang mengalami reduksi 20%, 40%, 80% dengan waktu pengelasan 5 detik.....	55
<b>Gambar 4.10.</b>	Efek variasi arus pengelasan terhadap laju korosi material yang mengalami reduksi 20%, 40%, 80% dengan waktu pengelasan 10 detik.....	56

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b> Seri baja tahan karat austenitik .....	11
<b>Tabel 2.2.</b> Pengaruh unsur paduan terhadap baja tahan karat austenitic .....	12
<b>Tabel 2.3.</b> Penggunaan mesin las TIG untuk beberapa logam .....	27
<b>Tabel 2.4.</b> Properti pada gas pelindung .....	27
<b>Tabel 3.1.</b> Komposisi kimia material .....	34
<b>Tabel 3.2.</b> Rancangan Eksperimen 316L .....	40
<b>Tabel 4.1.</b> Komposisi kimia <i>stainless steel</i> 316L .....	41
<b>Tabel 4.2.</b> Hasil pengerolan dingin baja tahan karat 316L .....	42
<b>Tabel 4.3.</b> Pengamatan secara makro .....	46
<b>Tabel 4.4.</b> Hasil pengujian Icorr total pada spesimen .....	50
<b>Tabel 4.5.</b> Hasil pengujian Icorr pada weld metal dengan potensiostat .....	51
<b>Tabel 4.6.</b> Hasil pengujian Icorr pada logam Induk dengan potensiostat .....	51
<b>Tabel 4.7</b> Hasil perhitungan Icorr pada HAZ .....	52
<b>Tabel 4.8.</b> Hasil laju korosi .....	53
<b>Tabel 4.9.</b> <i>Between subjects factors</i> .....	57
<b>Tabel 4.10.</b> <i>Test of between-subjects effect</i> .....	57
<b>Tabel 4.11</b> Hasil Tes terhadap pengaruh arus pengelasan .....	59
<b>Tabel 4.12.</b> Hasil Tes Terhadap Pengaruh Reduksi Pengerolan .....	60

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1. Latar Belakang**

*Stainless steel* 316 L adalah suatu logam paduan yang mempunyai sifat tahan korosi yang baik sehingga banyak dipakai didunia industri. Permasalahan yang sering timbul adalah ketika melakukan proses pengelasan, dimana pada saat mencapai temperature 500°C – 680°C pada *Stainless Steel* tipe 316L akan mengakibatkan terbentuknya presipitasi karbida chrom pada batas butir. Sehingga daerah sekitar batas butir mengalami *depletion chrom*, atau miskin kromium yaitu kurang dari 12% sebagai syarat baja menjadi tahan terhadap korosi. Apabila berada pada lingkungan korosif cenderung terjadi korosi batas butir (*intergranular corrosion*). Derajat Pengerjaan dingin dan temperatur operasi dari suatu logam dapat mempengaruhi sifat mekanik dan juga ketahanannya terhadap korosi. Pada umumnya pengerjaan dingin dapat memperbaiki sifat mekanik yaitu kekuatan dan ketahanan lelah. Namun, logam tersebut akan semakin peka terhadap korosi.

*Integranular corrosion* adalah permasalahan yang sangat penting saat sebuah *stainlees steel* dilakukan pengerjaan pada temperatur 500<sup>0</sup>-680<sup>0</sup>C, dikarenakan bisa menyebabkan terbentuknya presipitasi karbida pada batas butir. Metode untuk mencegah terjadinya sensitasi bisa dengan mengurangi kadar karbon dari material, menstabilkan atom karbon, dengan menambahkan titanium, niobium, zirkonium, atau dengan solution heat treatment.

Studi terbaru tentang *grain boundary* menunjukkan bahwa fenomena *grain boundary* seperti presipitasi korosi, sangat tergantung pada sifat dasar kristal dan struktur atom dari *grain boundary*. Keterkaitan struktur *grain boundary* dan presipitasi karbida telah diketahui pada paduan nikel dan *stainless steel* austenitic. Ada indikasi *twin boundary* tidak rentan terhadap presipitasi karbida dan korosi, dikarenakan struktur atomnya

sangat teratur dan koheren jika dibanding *grain boundary*. *Twin boundary* memiliki ketahanan yang luar biasa terhadap presipitasi karbida dikarenakan mempunyai *energy boundary* yang sangat rendah.

Beberapa penelitian telah dilakukan mengenai pengaruh pengerolan dingin terhadap kerentanan korosi ini diantaranya adalah Pada penelitian Gerald Oxtoviaendrew Picarima [1] dengan judul “*Pengaruh arus, kecepatan las dan jarak penyemprotan media pendingin terhadap pembentukan presipitasi karbida krom pada SS 304 dengan pengelasan GTAW*”. Diperoleh hasil bahwa jika arus pengelasan semakin rendah maka terbentuknya presipitasi karbida krom semakin tinggi, dan apabila kecepatan las semakin tinggi maka kuantitas presipitasi karbida krom akan semakin tinggi.

Setiawati Ainur Ridho [2] dengan judul penelitian “*Pengaruh Pengerolan Dingin Dan Temperatur Annealing Terhadap Ketahanan Korosi Integranular Pada Austenitic Stainless Steel Tipe 304*”. Mendapatkan hasil bahwa hasil stuktur mikro sangat berpengaruh terhadap ketahanan korosi dari *austenit stainless steel* dalam hal ini yaitu AISI 304. Untuk material yang mengalami pengerjaan dingin dan annealing diatas temperatur rekristalisasi maka terbentuk twin-boundary yang lebih tahan terhadap korosi intergranular.

Andi Nugraha [3] dengan penelitian “*Pengaruh Pengerolan Dingin Terhadap Ketahanan Korosi Stainless Steel 316 L Sebagai Material Implan Medis*”. Hasil yang didapat yaitu dimana pada proses pengerolan dingin meningkatkan kekuatan pada material dalam hal ini material SS 316L. Sehingga terjadi penurunan laju korosi pada stainless steel yang mengalami pengerjaan dingin seiring dengan bertambahnya derajat deformasi. Hal ini diperkirakan sebagai akibat dari semakin stabilnya lapisan oksida pasif pada permukaannya sebagai akibat dari proses pengerjaan dingin yang dilakukan.

Sebabnya dalam tugas akhir ini akan diteliti pengaruh perlakuan cold rolling terhadap ketahanan korosi intergranular yang diakibatkan oleh proses pengelasan dengan GTAW.

## 1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana hasil modifikasi mikrostruktur *stainless steel austenitic* dengan *cold rolling* untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi intergranular pada proses pengelasan dengan GTAW.
2. Seperti apa pengaruh parameter pada pengelasan GTAW untuk pengelasan *stainless steel austenitic* 316 L yang telah dilakukan pengerolan dingin.
3. Bagaimana laju korosi hasil pengelesan GTAW yang telah di lakukan cold rolling.

## 1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui hasil mikrostruktur *stainless steel* 316L dari hasil *cold rolling*.
2. Mengetahui pengaruh parameter pengelasan *stainless steel* 316L terhadap kerentanan korosi setelah dilakukan pengerolan dingin.
3. Mengetahui pengaruh variasi reduksi cold rolling terhadap hasil laju korosi pada pengelasan GTAW 316 L.

## 1.4. Batasan Masalah

Agar penelitian yang dilakukan tidak terlalu luas cakupannya, maka harus digunakan beberapa batasan masalah:

1. Alat uji atau peralatan yang digunakan dalam kondisi baik.
2. Waktu pengerolan dianggap konstan.
3. Parameter yang digunakan saat pengelasan adalah lama waktu pengelasan dan besar arus.



### **1.5. Manfaat Penelitian**

Dari penelitian ini diharapkan akan memberikan manfaat bagi masyarakat dan dunia industri pada khususnya, adapun manfaat tersebut adalah:

1. Sebagai bahan referensi bagi penelitian sejenis dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang korosi
2. Menambah pengetahuan tentang laju korosi stainless steel austenitic.
3. Sebagai masukan pada industri yang menggunakan stainless steel austenitic dalam proses produksi.

### **1.6. Sistematika Penulisan**

Dalam pembahasan Laporan Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima bab, dengan susunan sistematika sebagai berikut:

#### **BAB 1 PENDAHULUAN**

BAB 1 membahas mengenai latar belakang masalah penyusunan laporan Tugas Akhir rumusan masalah, batasan masalah yang dibahas, tujuan yang ingin didapatkan, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

#### **BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA**

BAB 2 membahas mengenai landasan pustaka, mode kerusakan baterai dan *depth of discharge*.

#### **BAB 3 METODE PENELITIAN**

BAB 3 membahas mengenai bahan penelitian, alat penelitian, *flowchart* penelitian, langkah preparasi material pengujian, proses pengujian spesimen dan hipotesa.

#### **BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN**

BAB 4 berisi mengenai hasil pengujian, dan pembahasan mengenai hasil pengujian.

#### **BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN**

BAB 5 berisi mengenai kesimpulan dan saran untuk penyempurnaan penelitian.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Struktur Kristal Dan Deformasi**

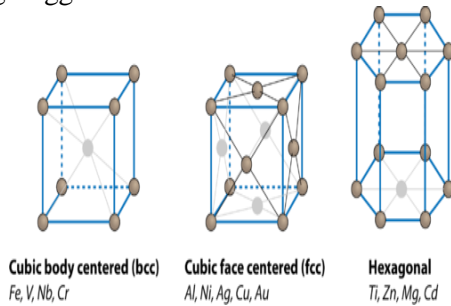
##### **2.1.1. Struktur Kristal**

Logam seperti bahan lainnya, terdiri dari susunan atom-atom. Untuk lebih memudahkan pengertian, maka dapat dikatakan bahwa atom-atom dalam kristal logam tersusun secara teratur dan susunan atom-atom tersebut menentukan struktur kristal dari logam. Susunan dari atom-atom tersebut disebut sel unit.

Pada temperatur kamar, besi atau baja memiliki bentuk struktur BCC (Body Centered Cubic). Dalam hal ini cell unit dari atom-atom disusun sebagai sebuah kubus dengan atom-atom menempati kedelapan dari sudut kubus dan satu atom berada di pusat kubus. Pada temperatur yang tinggi, besi atau baja memiliki bentuk struktur FCC (Face Centered Cubic). Dalam hal ini, cell unit adalah sebuah kubus dengan atom-atom menempati kedelapan dari sudut kubus dan atom lainnya berada pada pusat masing-masing dari enam keenam bidang kubus. Disamping berbentuk kubus, cell unit lainnya dapat berupa HCP (Hexagonal Close Packed), seperti halnya pada logam seng. Dalam hal ini atom-atom menempati kedua belas sudut, atom lain menempati dua sisi dan ketiga atom lagi menempati tengah.

Susunan atom-atom dalam struktur kristal sangat menentukan sifat-sifat logamnya. Logam dengan struktur kristal BCC mempunyai kerapatan atom yang lebih rendah dibandingkan logam dengan struktur kristal FCC. Perbedaan kerapatan atom itu dapat dilihat dari jumlah bidang gesernya. Pada struktur kristal BCC, jumlah bidang gesernya lebih sedikit dari struktur kristal FCC, sehingga kemampuan atom-atom untuk bergeser lebih sulit. Dengan demikian, logam dengan struktur kristal BCC membutuhkan energi lebih besar untuk mengerakkan dislokasi. Hal ini yang menyebabkan logam dengan struktur kristal BCC lebih sulit dibentuk jika dibandingkan logam dengan struktur

kristal FCC yang mempunyai kekuatan rendah tetapi memiliki keuletan yang tinggi



Gambar 2.1 Bentuk struktur kristal

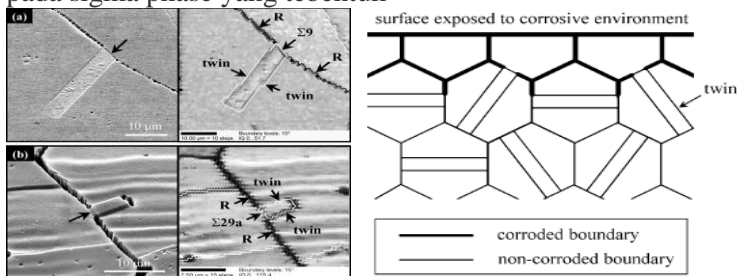
### 2.1.2. Deformasi Twinning

*Deformation twinning* terjadi bila satu bagian dari butir Kristal berubah orientasinya sedemikian rupa sehingga susunan atom di bagian tersebut akan membentuk simetri dengan bagian Kristal yang lain yang tidak mengalami twinning. Susunan atom pada bagian yang mengalami twinning ini merupakan *mirror image* dari bagian yang tidak mengalami twinning. Bidang yang menjadi pusat simetri antara kedua bagian itu dinamakan *twinning plane*.

Pada twinning pergerakan atom terjadi sekaligus pada seluruh atom (pada twinned region) bergerak bersamaan. Dari hal tersebut bahwa untuk terjadinya twinning diperlukan tenaga yang cukup besar, karena itu tidak banyak logam yang padanya dijumpai twinning. Twinning dapat terjadi sebagai akibat gaya mekanik yang disebut mechanical twins, atau dapat juga terjadi pada Kristal yang telah dideformasi lalu di anneal, disebut annealing twins.

Pada mikroskop twinning dapat ditandai dengan adanya dua garis sejajar ditengah Kristal. Dengan adanya twin boundary akan mengakibatkan meningkatnya ketahanan korosi pada stainless steel karena besar kecilnya chromium depletion yang

merupakan penyebab terjadinya korosi intergranular bergantung pada sigma phase yang terbentuk



Gambar 2.2 Twin Boundary

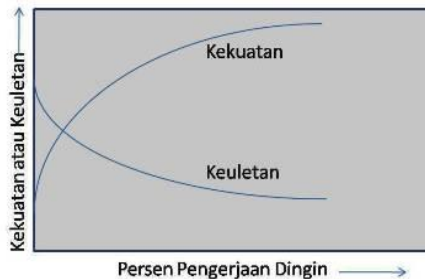
## 2.2. Pengaruh Pengerjaan Dingin

Pengerjaan dingin (cold working) yang merupakan pembentukan plastis logam di bawah suhu rekristalisasi pada umumnya dilakukan disuhu kamar jadi tanpa pemanasan benda kerja. Suhu rekristalisasi yang dimaksud adalah suhu pada saat bahan logam akan mengalami perubahan struktur mikro. Perubahan struktur mikro ini akan mengakibatkan perubahan karakteristik bahan logam tersebut. Cold working sangat baik untuk produksi massal, mengingat diperlukannya mesin-mesin yang kuat dan perkakas yang mahal. Produk-produk yang dibuat biasanya harganya sangat rendah. Selain itu material yang menjadi sampah relatif lebih kecil daripada proses pemecinan.

Pada kondisi ini logam yang dideformasi mengalami peristiwa pengerasan regangan (strain-hardening). Logam akan bersifat makin keras dan makin kuat tetapi makin getas bila mengalami deformasi. Hal ini menyebabkan relatif kecilnya deformasi yang dapat diberikan pada proses pengerjaan dingin. Bila dipaksakan suatu perubahan bentuk yang besar, maka benda kerja akan retak akibat sifat getasnya. Proses pengerjaan dingin tetap menempati kedudukan yang khusus, dalam rangkaian proses pengerjaan. Langkah deformasi yang awal biasanya adalah pada temperatur tinggi. Misalnya proses pengerolan panas. Balok ingot, billet ataupun slab di rol panas menjadi bentuk yang lebih

tipis, misalnya pelat. Pada tahapan tersebut deformasi yang dapat diberikan relatif besar. Namun proses pengerolan panas ini tidak dapat dilanjutkan pada pelat yang relatif tipis. Memang mungkin saja suatu gulungan pelat dipanaskan terlebih dahulu pada tungku sampai temperaturnya melewati temperatur rekristalisasi. Akan tetapi bila pelat tersebut di rol, maka temperaturnya akan cepat turun sampai di bawah temperatur rekristalisasi. Hal ini disebabkan oleh besarnya panas yang berpindah dari pelat ke sekitarnya. Pelat yang tipis akan lebih cepat mengalami penurunan temperatur dari pada pelat yang tebal.

Keunggulan proses pengerjaan dingin adalah kondisi permukaan benda kerja yang lebih baik dari pada yang diproses dengan pengerjaan panas. Hal ini disebabkan oleh tidak adanya proses pemanasan yang dapat menimbulkan kerak pada permukaan. Keunggulan lainnya adalah naiknya kekerasan dan kekuatan logam sebagai akibat pengerjaan dingin. Namun hal ini diikuti oleh suatu kerugian, yaitu makin getasnya logam yang dideformasi dingin. Sifat-sifat logam dapat diubah dengan proses perlakuan pada (heat treatment). Perubahan sifat menjadi keras dan getas akibat deformasi dapat dilunakkan dan diuletkan kembali dengan proses anil (annealing).



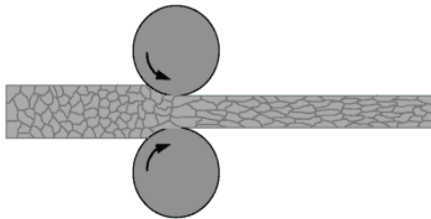
Gambar 2.3 Kurva persen pengerjaan dingin terhadap kekuatan dan keuletan

### 2.2.1. Cold Rolling

*Cold rolling* atau pengerolan dingin merupakan proses akhir dari rangkaian proses pengerolan. *Cold rolling* dilakukan

pada suhu ruang. Karena dilakukan pada suhu ruang, *cold rolling* memerlukan energi yang besar (karena material dengan suhu ruang memiliki kekuatan yang lebih besar) dan akan menghasilkan produk dengan sifat *anisotropic*.

*Cold rolling* bisa dibilang merupakan tahap *finishing*. Proses pengerolan ini menghasilkan permukaan akhir yang lebih baik. Selain itu *cold rolling* juga menghasilkan produk dengan dimensi yang lebih baik dan menghasilkan produk dengan kekuatan serta kekerasan yang lebih tinggi. Secara kinematika, pengerolan diklasifikasikan menjadi tiga macam. Pertama disebut pengerolan longitudinal, kedua pengerolan transversal, dan pengerolan *oblique*.



Gambar 2.4 Pengerolan dingin

### 2.3. Klasifikasi Baja Tahan Karat

Pada umumnya baja tahan karat mengandung chromium minimal 10,5% (ada juga yang menyebutkan minimal 12%). Chromium bersifat unik, di mana dia dapat membentuk lapisan pasif pada permukaan baja. Hal tersebut dapat memberikan perlindungan dari karat. Berdasarkan struktur mikro atau mekanisme peningkatan kekuatannya, baja tahan karat dibagi menjadi lima jenis. Jenis-jenis baja tahan karat antara lain:

1. Baja tahan karat autenitik.
2. Baja tahan karat ferritic.
3. Baja tahan karat martensitik.
4. Baja tahan karat presipitasi hardening.
5. Baja tahan karat duplex.

### 2.3.1 Baja Tahan Karat Austenitik

*Austenitic stainless steel* memiliki paduan yang cukup untuk menstabilkan *austenite* pada suhu ruang. Baja ini bersifat non *ferromagnetic*. Baja tahan karat *austenitic* memiliki sifat mampu bentuk dan keuletan pada suhu rendah yang sangat baik. Selain itu baja tahan karat *austenitic* juga memiliki sifat mampu las dan ketahanan karat yang sangat baik. Baja tahan karat jenis ini sangat cocok diterapkan pada sistem dengan suhu tinggi. Di sisi lain baja tahan karat *austenitic* relatif memiliki kekuatan *yield* yang rendah dan hanya dapat ditingkatkan kekuatannya dengan pengerjaan dingin (*cold working*), *precipitation hardening*, atau *substitutional solid solution strengthening*.

Menurut standar AISI-SAE, baja tahan karat *austenitic* umumnya memiliki nomor 3xx. Material AISI-SAE 3xx merupakan paduan ferro-karbon-chromium-nickel dengan kandungan chromium sebesar 16%-26% dan kandungan nickel sebesar 6%-22%. Baja tahan karat *austenitic* yang populer adalah tipe AISI-SAE 304, di mana mengandung 18%-20% Cr dan 8%-12% Ni.

Pada baja tahan karat *austenitic*, pembatasan karbon sangatlah penting. Ketika dipanaskan, karbon akan membentuk *chromium carbide* yang mengendap pada batas butir *austenite* dan menimbulkan kondisi yang dikenal dengan istilah *sensitization*. Karena chromium terikat sebagai *carbide*, maka chromium akan berdekatan dengan batas atom dan memberikan ruang kosong sebagai tempat terbentuknya karat. *Sensitization* dapat diubah dengan memanaskan baja pada suhu 1040-1150°C dan diikuti dengan pendinginan ke suhu ruang dengan cepat. Suhu tinggi bisa menyebabkan *carbide* hancur. Sedangkan pendinginan cepat dapat mencegah pengendapan ulang dari *carbide*.

Tabel 2.1, dibawah ini adalah merupakan daftar baja tahan karat. Baja tahan karat type 201 dan 202 adalah sama dengan tipe 301 dan 302 kecuali jika manganes ditambahkan

untuk menggantikan Nikel. Baja tahan karat austenitik memiliki kekuatan yang sangat baik dan tahan korosi pada temperatur yang tinggi. Molibdenum ditambahkan untuk meningkatkan kekuatannya pada suhu yang tinggi. Baja tahan karat austenitik juga baik untuk penerapan pada temperatur yang rendah.

Tabel 2.1 Seri baja tahan karat austenitik

AISI Type	C %	Cr %	Ni %	Other dalam %
201	0,15	16 – 18	3,5 – 5,5	N. 0,25 ; Mn. 5,5 – 7,5 ;
202	0,15	17 – 19	4,0 – 6,0	P. 0,06
301	0,15	16 – 18	6,0 – 8,0	N. 0,25 ; Mn. 7,5 – 10 ;
302	0,15	17 – 19	8,0 – 10,0	P. 0,06
304	0,08	18 – 20	8,0 – 12,0	-
304 L	0,03	18 – 20	8,0 – 12,0	-
308	0,08	19 – 21	10,0 – 12,0	-
309	0,20	22 – 24	12,0 – 15,0	-
310	0,25	24 – 26	19,0 – 22,0	-
316	0,08	16 – 18	10,0 – 14,0	-
316 L	0,03	16 – 18	10,0 – 14,0	-
317	0,08	18 – 20	11,0 – 15,0	Si. 1,50

Namun pada baja tahan karat austenitic tertentu mudah terjadi presipitasi karbida kromium ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_7$ ) pada batas butirnya jika didinginkan atau dipanaskan lambat pada range temperature 500 – 850°C. Presipitasi ini menyebabkan kandungan Cr di sekitar batas butir kurang dari 12%, sehingga ketahanan korosi menjadi menurun dan akan terjadi korosi yang sering disebut sebagai korosi batas butir.

### 2.3.2. Unsur Paduan Baja Tahan Karat Austenitik

Unsur utama paduan baja tahan karat austenitic adalah kromium, yang merupakan unsur paduan pembentuk ferrit, dan nikel (Ni) yang merupakan penstabil austenite yang kadar kandungan kromium umumnya lebih dari 16%, sedangkan untuk nikel lebih dari 8%. Inilah yang menyebabkan baja tahan karat austenitic stabil dalam fase austenite. Unsur paduan sebesar itu yang menyebabkan baja tahan karat austenitic mempunyai kekuatan tinggi serta ketahanan pada temperature tinggi yang bias



mencapai 625°C, kandungan Ni juga menyebabkan ketangguhan serta keuletan yang baik.

Pengaruh unsur paduan lain dijelaskan pada table 2.2, sebagai contoh sulfur ditambahkan untuk menambahkan kedalaman penetrasi pada saat pengelasan. Unsur nitrogen dan molybdenum juga menambahkan kekuatan serta ketahanan terhadap pitting corrosion. Niobium ditambahkan pada baja tahan karat austenitic sebagai penstabil karbida, sehingga ketahanan terhadap korosi intergranular meningkat.

Tabel 2.2. Pengaruh unsur paduan terhadap baja tahan karat austenitic

Element	Types or Grades of Steel	Effects
Carbon	All types	Strongly promotes the formation of austenite. Can form a carbide with chromium that can lead to intergranular corrosion.
Chromium	All types	Promotes formation of ferrite. Increases resistance to oxidation and corrosion.
Nickel	All types	Promotes formation of austenite. Increases high-temperature strength, corrosion resistance, and ductility.
Nitrogen	XXXN	Is a very strong austenite former. Like carbon, nitrogen is many times as effective as nickel in forming austenite. Increases strength, especially at cryogenic temperatures. Increases resistance to pitting corrosion.
Niobium	347	Added primarily to combine with carbon to reduce susceptibility to intergranular corrosion. Acts as a grain refiner. Promotes the formation of ferrite. Improves creep strength, but decreases creep ductility.
Manganese	2XX	Promotes the stability of austenite at or near room temperature but forms ferrite at high temperatures. Inhibits hot shortness by forming manganese sulfide.
Molybdenum	316, 317	Improves strength at high temperatures. Improves corrosion resistance to reducing media. Promotes the formation of ferrite.
Selenium or Sulfur	303, 303Se	Increases machinability but promotes hot cracking during welding. Lowers corrosion resistance slightly. Increases weld penetration in gas tungsten arc welding.
Silicon	2008	Increases resistance to scaling. Promotes formation of ferrite, and of sigma when greater than 1%. Small amounts are added to all grades for deoxidizing purposes. Increases fluidity including wetting of weld metal to base metal.
Titanium	321	Added primarily to combine with carbon to reduce susceptibility to intergranular corrosion. Acts as a grain refiner. Promotes the formation of ferrite. Improves creep strength.
Copper	CN-7M	Generally added to stainless steels to increase corrosion resistance to certain environments. Decreases susceptibility to stress-corrosion cracking and provides age-hardening effects.

## 2.4. Korosi

### 2.4.1 Pengertian Korosi

Definisi dari korosi adalah kerusakan atau penurunan mutu dari material akibat bereaksi dengan lingkungan, dalam hal ini adalah interaksi secara kimiawi. Sedangkan penurunan mutu yang diakibatkan interaksi secara fisik bukan disebut korosi, namun biasa dikenal sebagai erosi dan keausan. Contoh korosi antara lain: karat besi dan paduannya pada temperatur kamar,

kerak baja pada temperatur tinggi, noda pada perak, dan lain sebagainya. Menurut jenis reaksinya korosi dibagi menjadi dua yaitu korosi kimia atau biasa disebut korosi kering (*Dry Corrosion*) dan korosi elektrokimia biasa disebut korosi basah (*Wet Corrosion*). *Wet corrosion* terjadi ketika ada fasa cair yang terlibat dalam proses korosi. Korosi ini biasanya melibatkan larutan berair atau elektrolit. Contoh yang sering dijumpai adalah korosi besi karena berada dilngkungan berair. *Dry corrosion* terjadi karena tidak adanya fasa cair atau fasa diatas titik embun dari lingkungan. Penyebab dari korosi ini adalah uap air dan gas-gas yang ada di lingkungan sekitarnya. Korosi ini paling sering dikaitkan dengan suhu yang tinggi.

Akan lebih mudah untuk mengklasifikasikan korosi berdasarkan penampilan atau rupa logam yang terserang korosi. Masing-masing bentuk korosi dapat dikenali dengan hanya melakukan pengamatan secara visual. Pada kebanyakan kasus, pengamatan bentuk korosi hanya dengan mata telanjang sudah cukup. Tetapi kadang-kadang pengamatan dengan menggunakan perbesaran juga dibutuhkan. Informasi yang penting untuk solusi dari masalah korosi sering diperoleh melalui pengamatan yang cermat dari spesimen uji korosi. Beberapa dari delapan bentuk korosi adalah bersifat unik. Delapan bentuk korosi tersebut adalah : *uniform or general attack, galvanic, crevice corrosion, pitting, intergranular corrosion, selective leaching, erosion corrosion, and stres corrosion*. Bentuk-bentuk korosi tersebut mencakup hampir semua kegagalan korosi. *Hydrogen damage* adalah bukan bentuk korosi, akan tetapi sering terjadi akibat dari serangan korosi.

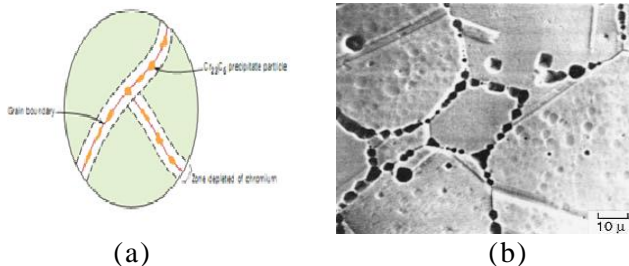
## **2.4.2. Korosi Batas Butir**

Korosi merupakan fenomena yang menarik banyak perhatian, karena jika tidak ditangani dengan tepat akan menyebabkan kerugian yang sangat besar. Korosi adalah gejala penurunan kualitas material akibat bereaksi denganlingkungannya, korosi merupakan fenomena alamiah suatu material menuju keseimbangan. Oleh karena banyaknya

modifikasi pada material yang sering diaplikasikan seringkali menyebabkan komponen metal tidak stabil terhadap perubahan lingkungan.

Secara garis besar faktor-faktor yang mempengaruhi cepat atau lambatnya suatu proses korosi adalah, antara lain material konstruksi, kondisi lingkungan atau media, bentuk konstruksi, dan fungsi konstruksi. Korosi tidak dapat dicegah tetapi lajunya dapat dikurangi. Korosi bisa dibagi dalam 2 kategori tergantung dari aspek – aspek tadi, namun secara garis besar ada dua jenis korosi yaitu korosi basah dan korosi kering. Korosi kering terjadi karena tidak adanya cairan atau terjadi pada temperatur di atas titik embun lingkungan. Korosi ini biasanya terjadi pada suhu yang relatif tinggi, atau dalam lingkungan udara yang kering. Korosi jenis ini, sering disebut dengan proses oksidasi bila logam bereaksi dengan oksigen, sulfidasi bila bereaksi dengan sulfida atau carburisasi jika bereaksi dengan karbon-di/mono-oksida. Oksidasi sering dijumpai pada sudu turbin gas, ruang bakar, dan bagian mesin yang bekerja pada temperatur tinggi. Korosi basah biasanya terjadi di lingkungan yang basah. Pada temperatur yang relatif rendah, dengan berbagai bentuk korosi yang berbeda. Mengikuti mekanisme elektrokimia yaitu terjadi reaksi oksidasi (reaksi anodik) dan reaksi reduksi (reaksi katodik). Korosi ini seringkali terjadi secara merata pada permukaan atau lokal pada daerah tertentu dari bagian mesin, sehingga menjadi masalah yang sangat serius di industri.

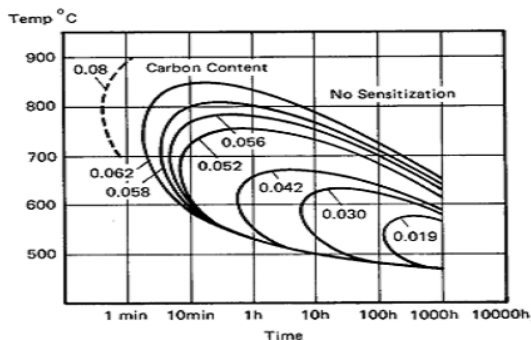
Pada dasarnya korosi batas butir bisa disebabkan oleh dua hal, pertama dikarenakan terbentuknya karbida pada batas butir sehingga daerah sekitar butir mengalami pengikisan kromium, dan yang kedua karena adanya atom unsur yang mengalami segregasi dalam batas butir seperti sulfur dan silisium. Sehingga akan ada beda potensial antara batas butir dengan sekitar batas butirnya.



. Gambar 2.5 a.Mekanisme korosi batas butir  
b.Hasil metalografi terjadi presipitasi karbida

### 2.4.3. Mekanisme Korosi Batas Butir

Korosi ini termasuk korosi yang disebabkan oleh perubahan sifat metalurgi, dimana ketika *stainless steel* autenitic 316L berada pada temperature 500°C – 680°C ketika dipanaskan atau dibiarkan mendingin secara perlahan- lahan (seperti halnya setelah welding atau pendinginan setelah *annealing* ) maka karbon akan menarik krom untuk membentuk partikel kromium karbida (*chromium carbide*) di daerah batas butir pada stainless steel.



Gambar 2.6 Pengaruh kadar karbon terhadap presipitasi karbida

Formasi kromium karbida yang terkonsentrasi pada batas butir akan menghilangkan/ mengurangi sifat perlindungan

kromium pada daerah sekitar batas butir. Sehingga daerah ini akan mudah terserang oleh korosi. Secara umum SS dengan kadar karbon <2% relative tahan terhadap korosi ini. Ketidak sempurnaan mikrostruktur diperbaiki dengan menambahkan unsur seperti titanium, molibdenum, nikel, niobium.

#### **2.4.4. Pencegahan dan Kontrol Korosi Batas Butir**

Kontrol korosi dapat dilakukan dengan mengidentifikasi tiga aspek penting terjadinya korosi yaitu material, lingkungan, serta kontak atau reaksi. Pada kasus korosi batas butir baja tahan karat austenitik, yang paling mungkin dilakukan adalah memodifikasi dan dalam proses pengerjaan. Beberapa yang telah dilakukan antara lain:

1. Membuat paduan baja tahan karat austenitic dengan kadar karbon yang rendah, karena presentase karbida yang tinggi akan mengakibatkan semakin banyak kromium yang akan membentuk karbida, sehingga banyak kromium yang akan berdifusi menuju batas butir. Biasanya digunakan paduan dengan kadar karbon yang kurang dari 0,03% untuk meminimalkan terjadinya korosi batas butir, namun kendalanya pada proses produksi yang membutuhkan biaya yang relative mahal.
2. Menambahkan unsur paduan titanium (Ti), niobium (Nb), atau columbium (Cb) pada baja tahan karat. Ti, Nb, Cb, merupakan komponen penstabil karbida, ketiga atom dari unsur tersebut lebih reaktif dari kromium. Sehingga kromium tidak akan membentuk karbida kromium karena karbon telah bereaksi dengan ketiga unsur tersebut. Pada akhirnya penurunan relative berat kromium sekitar batas butir tidak terjadi.
3. Melakukan konfigurasi pengerjaan sehingga temperature sensitasi ( $500^{\circ}\text{C} - 680^{\circ}\text{C}$  yang terjadi tidak berlangsung lama.
4. Melakukan solusi pada treatment, yaitu melarutkan kembali karbida yang terbentuk dan di quench dengan cepat sehingga

temperature sensitasi terlampaui dengan cepat. Solusion treatment dilakukan dengan memanaskan kembali dengan temperature sekitar  $1100^{\circ}\text{C}$  sehingga semua karbida larut kembali dalam austenite dan kemudian di quench dengan media air atau media yang mempunyai nilai severity tinggi.

#### 2.4.5. Potensiostat

Potensiostat dengan tiga elektroda merupakan perangkat laboratorium baku untuk penelitian kuantitatif terhadap sifat-sifat korosi bahan yang merupakan kesempurnaan dari sel korosi basah (Trethewey, 1991). Gambar 2.2 menunjukkan contoh rangkaian pada peralatan tersebut. Tiga elektroda yang bekerja dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Elektroda kerja (*working electrode*)

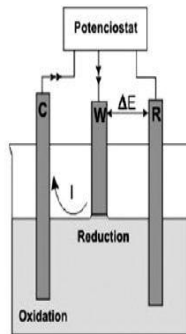
Elektroda kerja (*working electrode*) merupakan istilah yang dipakai untuk menggantikan elektroda yang sedang diteliti. Elektroda kerja dapat disiapkan dengan cara memasang sebuah spesimen dalam resin, dan disambung dengan kawat tembaga untuk menghubungkan arus listrik.

2. Elektroda pembantu (*counter electrode*)

Elektroda pembantu berfungsi untuk mengangkut arus dalam rangkaian yang terbentuk dalam penelitian, akan tetapi elektroda pembantu tidak dapat digunakan untuk pengukuran potensial. Bahan dari elektroda pembantu ini biasanya menggunakan batang karbon, selain batang karbon bisa juga menggunakan platina dan emas.

3. Elektroda acuan

Elektroda acuan merupakan titik dasar untuk mengacu pengukuran elektroda kerja. Arus yang mengalir melalui elektroda ini harus kecil bila tidak elektroda ini akan ikut dalam reaksi sel, sehingga potensialnya tidak lagi konstan.



Gambar 2.7 Rangkaian potensiostat dengan tiga elektroda (Trethewey, 1991)

Polarisasi terjadi ketika suatu logam tidak berada dalam keseimbangan dengan larutan yang mengandung ion, potensial elektrodanya berbeda dari potensial korosi bebas (Trethewey, 1991). Polarisasi merupakan fenomena dalam korosi yang bisa dimanfaatkan untuk menentukan laju korosi logam.

Laju korosi dapat diartikan sebagai laju penurunan kualitas bahan terhadap waktu. Salah satu langkah yang dapat digunakan untuk menghitung laju korosi adalah dengan memanfaatkan metode berdasar prinsip-prinsip elektrokimia. Metode elektrokimia merupakan metode yang digunakan untuk mencari nilai laju korosi. Rumus yang digunakan dalam menentukan laju korosi dengan metode elektrokimia didasari dengan hukum Faraday melalui persamaan 2.1.

$$CR = \frac{0.00327 I EW}{D}$$

Dimana: CR = Laju korosi (mm/year)

I = Kerapatan arus ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

EW = Berat *equivalent* (gram/mol)

D = Densitas material ( $\text{gram}/\text{cm}^3$ )

## **2.5. Proses Pengelasan**

Proses pengelasan berkaitan dengan lempengan baja yang dibuat dari kristal besi dan karbon sesuai struktur mikronya, dengan bentuk dan arah tertentu. Lalu sebagian dari lempengan logam tersebut dipanaskan hingga meleleh. Kalau tepi lempengan logam itu disatukan, terbentuklah sambungan. Umumnya, pada proses pengelasan juga ditambahkan dengan bahan penyambung seperti kawat atau batang las. Kalau campuran tersebut sudah dingin, molekul kawat las yang semula merupakan bagian lain kini menyatu.

Proses pengelasan tidak sama dengan menyolder di mana untuk menyolder bahan dasar tidak meleleh. Sambungan terjadi dengan melelehkan logam lunak misalnya timah, yang meresap ke pori-pori di permukaan bahan yang akan disambung. Setelah timah solder dingin maka terjadilah sambungan. Perbedaan antara solder keras dan lunak adalah pada suhu kerjanya di mana batas kedua proses tersebut ialah pada suhu 450 derajat Celcius. Pada pengelasan, suhu yang digunakan jauh lebih tinggi, antara 1500 hingga 1600 derajat Celcius.

Sampai pada waktu ini banyak sekali cara-cara pengklasifikasian yang digunakan dalam bidang las, ini disebabkan karena perlu adanya kesepakatan dalam hal-hal tersebut. Secara konvensional cara-cara pengklasifikasi tersebut v pada waktu ini dapat dibagi dua golongan, yaitu klasifikasi berdasarkan kerja dan klasifikasi berdasarkan energi yang digunakan. Klasifikasi pertama membagi las dalam kelompok las cair, las tekan, las patri dan lain-lainnya. Sedangkan klasifikasi yang kedua membedakan adanya kelompok-kelompok seperti las listrik, las kimia, las mekanik dan seterusnya.

Bila diadakan pengklasifikasian yang lebih terperinci lagi, maka kedua klasifikasi tersebut diatas dibaur dan akan terbentuk kelompok-kelompok yang banyak sekali.

Di antarakedua cara klasifikasi tersebut diatas kelihatannya klasifikasi cara kerja lebih banyak digunakan karena itu



pengklasifikasian yang diterangkan dalam bab ini juga berdasarkan cara kerja.

Berdasarkan klasifikasi ini pengelasan dapat dibagi dalam tiga kelas utama yaitu : pengelasan cair, pengelasan tekan dan pematrian.

1. Pengelasan cair adalah cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan sampai mencair dengan sumber panas dari busur listrik atau sumber api gas yang terbakar.
2. Pengelasan tekan adalah cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan dan kemudian ditekan hingga menjadi satu.
3. Pematrian adalah cara pengelasan dimana sambungan diikat dan disatukan dengan menggunakan paduan logam yang mempunyai titik cair rendah. Dalam hal ini logam induk tidak turut mencair.

### 2.5.1. Input Panas

Sumber energi panas yang bersumber dari energi listrik memanfaatkan fenomena *short circuits*, sehingga akan menimbulkan panas yang tinggi yang mampu mencairkan logam yang akan disambung. Besarnya energi yang akan digunakan disesuaikan dengan kebutuhan material yang akan disambung dan juga konstruksi mesin lasnya. Secara umum dapat dirumuskan sebagai.

$$H = \eta \cdot E \cdot I \cdot t \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

$$H = \eta \frac{E \cdot I}{V} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana :

H = heat input (J/mm)

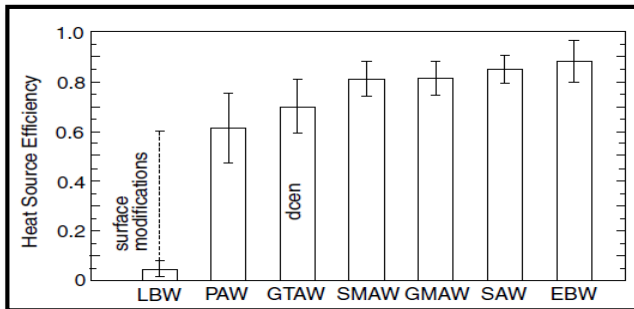
$\eta$  = efisiensi

E = voltase (volt)

I = Arus (ampere)

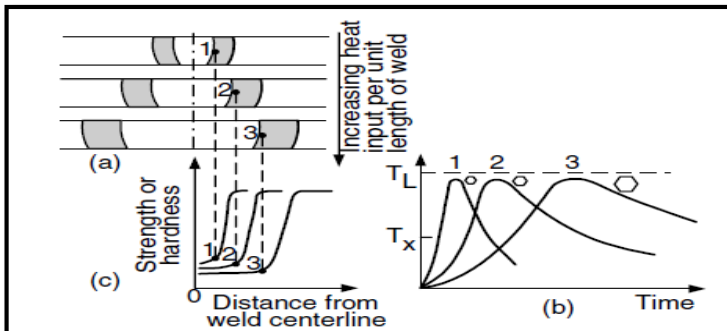
T = waktu pengelasan (detik)

V = kecepatan pengelasan (mm/detik)



Gambar 2.8 Efisiensi sumber panas pada beberapa proses las

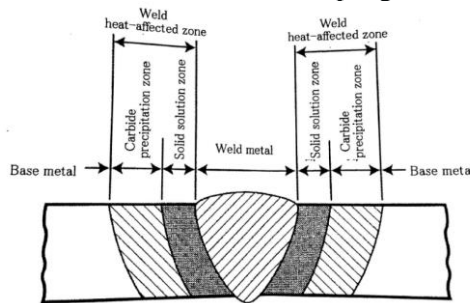
Input panas yang diberikan akan merambat secara konveksi maupun konduksi material yang dilas, sehingga menimbulkan daerah-daerah tertentu yang dibagi menurut perubahan-perubahan struktur mikronya. Secara umum akibat input panas material sekitar lasan dibagi dalam tiga kategori umum daerah lasan (*fusion zone*), daerah pencairan sebagian (*partially melted zone*) dan daerah pengaruh panas (*heat affected zone*). Besarnya atau luasnya daerah tersebut sangat dipengaruhi oleh energi density yang dikenakan pada material.



Gambar 2.9 Efek Heat Input pada Proses Pengelasan: (a) Hubungan dengan lebar HAZ: (b) Siklus Termal Dekat Batas Fusion: (c) Kekuatan dan Kekerasan yang dihasilkan.

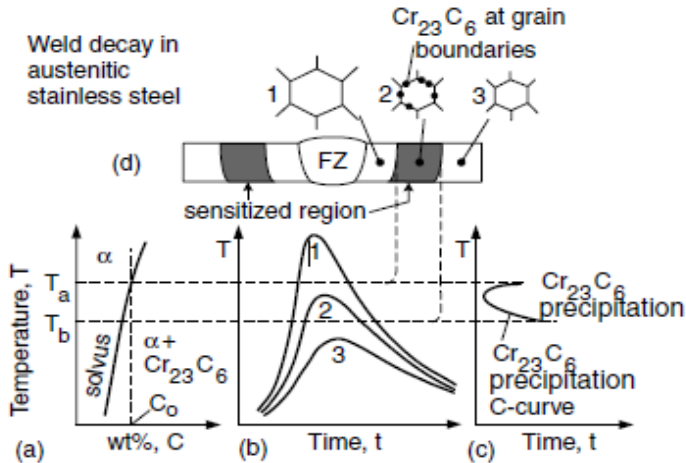
### 2.5.2. Daerah Pengaruh Panas

Logam akan mengalami pengaruh pemanasan akibat pengelasan dan mengalami perubahan struktur mikro disekitar daerah lasan. Bentuk struktur mikro bergantung pada temperatur tertinggi yang dicapai pada pengelasan, kecepatan pengelasan dan laju pendinginan daerah lasan. Daerah logam yang mengalami perubahan struktur mikro akibat mengalami pemanasan karena pengelasan disebut Heat Affected Zone. Daerah hasil pengelasan yang akan kita temui bila kita melakukan pengelasan, yaitu :



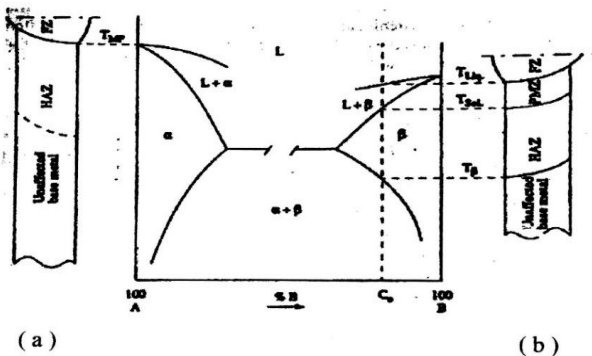
Gambar 2.10 Heat affected zone

Daerah HAZ merupakan daerah paling kritis dari hasil las, karena selain berubah strukturnya juga terjadi perubahan sifat pada daerah ini. Secara umum struktur dan sifat daerah panas efektif dipengaruhi dari lamanya pendinginan dan komposisi dari logam induk itu sendiri. Siklus termal las adalah proses pemanasan dan pendinginan yang terjadi pada daerah lasan. Proses las terjadi proses pemanasan dan juga pendinginan maka dapat dikatakan proses las juga proses heat treatment hanya saja terjadinya lokal, tidak seperti proses heat treatment pada umumnya. Untuk melihat fenomena proses tersebut dapat dilihat pada gambar grafik siklus termal las pada stainless steel.



Gambar 2.11 Grafik waktu pendinginan dan temperature

Pembagian daerah tersebut akan berbeda untuk logam yang murni, dimana logam yang murni tidak ada daerah yang mencair sebagian. Pada gambar 2.10 a dapat dilihat luas daerah masing-masing untuk logam murni, dimana tidak ada PMZ (*partially melted zone*), yaitu daerah logam induk yang mencair sebagian saja dan yang lain tidak mencair. Sedangkan untuk gambar 2.10 b dapat dilihat pembagian daerah untuk logam paduan.



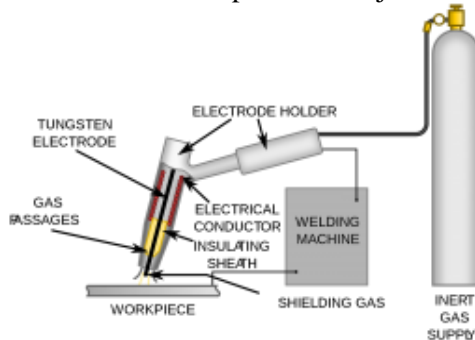
Gambar 2.12 Daerah-daerah akibat input panas

### 2.5.3 Tungsten Inert Gas (TIG) Welding

*Tungsten Inert Gas* atau *Gas tungsten arc welding* (GTAW) adalah proses las busur yang menggunakan busur antara tungsten elektroda (non konsumsi) dan titik pengelasan. Proses ini digunakan dengan perlindungan gas dan tanpa penerapan tekanan. Proses ini dapat digunakan dengan atau tanpa penambahan filler metal. GTAW telah menjadi sangat diperlukan sebagai alat bagi banyak industri karena hasil las berkualitas tinggi dan biaya peralatan yang rendah.

Prinsip : Panas dari busur terjadi diantara elektrode tungsten dan logam induk akan meleburkan logam pengisi ke logam induk di mana busurnya dilindungi oleh gas mulia (Ar atau He)

Las listrik TIG (Tungsten Inert Gas = Tungsten Gas Mulia) menggunakan elektroda wolfram yang bukan merupakan bahan tambah. Busur listrik yang terjadi antara ujung elektroda wolfram dan bahan dasar merupakan sumber panas, untuk pengelasan. Titik cair elektroda wolfram sedemikian tingginya sampai  $3410^{\circ}\text{C}$ , sehingga tidak ikut mencair pada saat terjadi busur listrik.



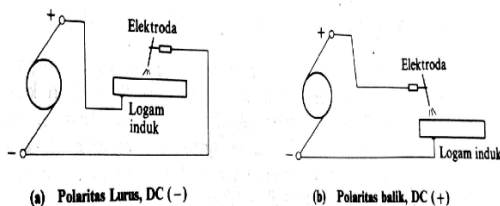
Gambar 2.13 Las TIG

Tangkai listrik dilengkapi dengan nosel keramik untuk menyembur gas pelindung yang melindungi daerah las dari luar pada saat pengelasan. Sebagian bahan tambah dipakai elektroda tanpa selaput yang digerakkan dan didekatkan ke busur yang terjadi antara elektroda wolfram dengan bahan dasar. Sebagai gas

pelindung dipakai gas inert seperti argon, helium atau campuran dari kedua gas tersebut yang pemakaiannya tergantung dari jenis logam yang akan dilas.

Penggunaan las GTAW mempunyai dua keuntungan, yaitu pertama kecepatan pengumpanan logam pengisi dapat diatur terlepas dari besarnya arus listrik sehingga penetrasi ke dalam logam induk dapat diatur semauanya. Cara pengaturan ini memungkinkan las GTAW dapat digunakan untuk pengelasan baik untuk plat baja tipis maupun tebal. Kedua adalah kualitas yang lebih baik dari daerah las. Karena hal-hal diatas maka las GTAW biasanya digunakan untuk mengelas baja-baja dengan kualitas tinggi seperti baja tahan karat, baja tahan panas, dan untuk mengelas logam-logam bukan baja.

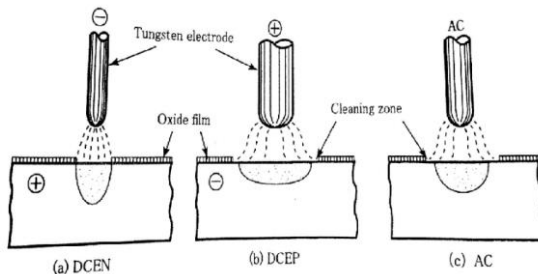
Sumber listrik yang digunakan untuk pengelasan GTAW dapat berupa listrik DC atau listrik AC. Dalam hal listrik DC rangkaian listriknya dapat dengan polaritas lurus dimana kutub positif dihubungkan dengan logam indu dan kutub negative dihubungkan dengan batang elektroda atau rangkaian sebaliknya yang disebut polaritas balik. Skema dari kedua rangkaian ini dapat dilihat dalam gambar 2.9.



Gambar 2.14 Diagram rangkaian listrik dari mesin las listrik DC.

Dalam polaritas lurus electron bergerak dari elektroda dan menumbuk logam induk dengan kecepatan yang tinggi sehingga dapat terjadipenetrasi yang dalam. Karena pada elektroda tidak terjadi tumbukan elektrone maka secara relative suhu elektroda tidak terlalu tinggi karena itu dengan polaritas ini dapat digunakan arus yang besar. Sebaliknya dalam polaritas

balik elektroda menjadi panas sekali, sehingga arus listrik yang dapat dialirkan menjadi rendah. Dalam ukuran elektroda yang sama dalam polaritas balik kira-kira hanya 1/10 arus pada polaritas lurus yang dapat dialirkan. Dengan polaritas balik penetrasi ke dalam logam induk menjadi dangkal dan lebar. Disamping itu terjadi proses ionisasi pada gas argon yang menyelubunginya dan terbentuk ion ion Ar positif, yang menumbuk logam dasar dan dapat melepaskan lapisan oksida yang ada pada permukaan. Karena sifatnya yang dapat membersihkan maka peristiwa ini dinamakan aksi pembersih. Bila dipergunakan arus AC maka proses yang terjadi akan sama dengan menggunakan arus searah dengan polaritas lurus dan polaritas balik yang digunakan secara bergantian. Karena hal ini maka dengan penggunaan arus bolak balik, hasil pengelasan akan terletak antara hasil pengelasan dengan arus searah dengan polaritas dengan arus searah dengan polaritas lurus dan polaritas balik. Pada umumnya busur yang dihasilkan dengan listrik DC kurang begitu mantap dan memantapkannya perlu ditambahkan listrik AC dengan frekuensi tinggi. Pengaruh polaritas terhadap proses pengelasan GTAW dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.15 Efek dari polaritas

Berdasarkan keterangan diatas, maka biasanya arus searah dengan polaritas lurus dipakai untuk pengelasan pada baja, sedangkan untuk aluminium karena permukaannya selalu dilapisi dengan oksida yang mempunyai titik cair yang tinggi, maka sebaiknya menggunakan arus bolak balik yang ditambahkan arus

bolak balik frekuensi tinggi. Pemakaian jenis polaritas dalam pengelasan beberapa macam logam ditunjukkan dalam table 2.3

Table 2.3 Penggunaan mesin las TIG untuk beberapa logam

Logam	Listrik AC frekuensi tinggi	Listrik DC polaritas lurus	Listrik DC polaritas balik
Baja	terbatas	sesuai	—
Baja tahan karat	terbatas	sesuai	—
Besi cor	terbatas	sesuai	—
Aluminium dan paduannya	sesuai	—	dapat untuk pelat tipis
Magnesium dan paduannya	sesuai	—	dapat untuk pelat tipis
Tembaga dan paduannya	terbatas	sesuai	—
Aluminium brons	sesuai	terbatas	—

Pada pengelasan dengan GTAW banyak gas pelindung yang bias digunakan antara lain argon dan helium. Tabel 2.4 menunjukkan beberapa daftar sifat-sifat gas pelindung. Seperti ditunjukkan pada tabel potensi ionisasi untuk argon dan helium masing-masing adalah 15,7 dan 24,5eV (electron volt). Karena lebih mudah mengionisasi karbon daripada helium, inisiasi nyala busur lebih mudah dan voltage dropp lebih rendah ddengan menggunakan argon. Argon memiliki densitas yang lebih berat dibandingkan dengan helium, sehingga argon lebih efektif sebagai pelindung. Dengan DCEP dan AC, argon juga memiliki tindakan pembersih oksida lebih banyak diabnding dengan helium. Selain itu ditambah biaya yang lebih murah pada argon yang membuatnya lebih banyak digunakan pada pengelasan GTAW.

Tabel 2.4 Properti pada gas pelindung

Gas	Chemical Symbol	Molecular Weight (g/mol)	Specific Gravity with Respect to Air at 1 atm and 0°C	Density (g/L)	Ionization Potential (eV)
Argon	Ar	39.95	1.38	1.784	15.7
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	44.01	1.53	1.978	14.4
Helium	He	4.00	0.1368	0.178	24.5
Hydrogen	H <sub>2</sub>	2.016	0.0695	0.090	13.5
Nitrogen	N <sub>2</sub>	28.01	0.967	1.25	14.5
Oxygen	O <sub>2</sub>	32.00	1.105	1.43	13.2



## 2.6. Penelitian Terdahulu

- Gerald Oxtoviandrew Picarima, “*Pengaruh arus, kecepatan las dan jarak penyemprotan media pendingin terhadap pembentukan presipitasi karbida krom pada SS 304 dengan pengelasan GTAW*”. Dalam tugas akhir saudara Gerald menganalisa pengaruh pengelasan GTAW terhadap pembentukan presipitasi karbida krom *stainless steel*. Hasil yang diperoleh yaitu bahwa jika arus pengelasan semakin rendah maka terbentuknya presipitasi karbida krom semakin tinggi, dan apabila kecepatan las semakin tinggi maka kuantitas presipitasi karbida krom akan semakin tinggi,
- Setiawati Ainur Ridho K, “*Pengaruh Pengerolan Dingin Dan Temperatur Annealing Terhadap Ketahanan Korosi Integranular Pada Austenitic Stainless Steel Tipe 304*”. Dalam tugas akhir saudara Ainur menganalisa pengaruh pengerolan dingin dan temperatur annealing terhadap ketahanan korosi 304. Hasil dari perolehan tugas akhirnya menyatakan bahwa dari penelitian ini diketahui bahwa stuktur mikro sangat berpengaruh terhadap ketahanan korosi dari austenit stainless steel dalam hal ini yaitu AISI 304. Untuk material yang mengalami pengerjaan dingin dan annealing diatas temperatur rekristalisasi maka terbentuk twin-boundary yang lebih tahan terhadap korosi intergranular.
- Andi Nugraha, “*Pengaruh Pengerolan Dingin Terhadap Ketahanan Korosi Stainless Steel 316 L Sebagai Material Implan Medis*. . Hasil dari perolehan tugas akhirnya menyatakan bahwa dari data yang diperoleh, proses pengerolan dingin meningkatkan kekuatan pada material, dan terjadi penurunan laju korosi pada stainless steel yang mengalami pengerjaan dingin seiring dengan

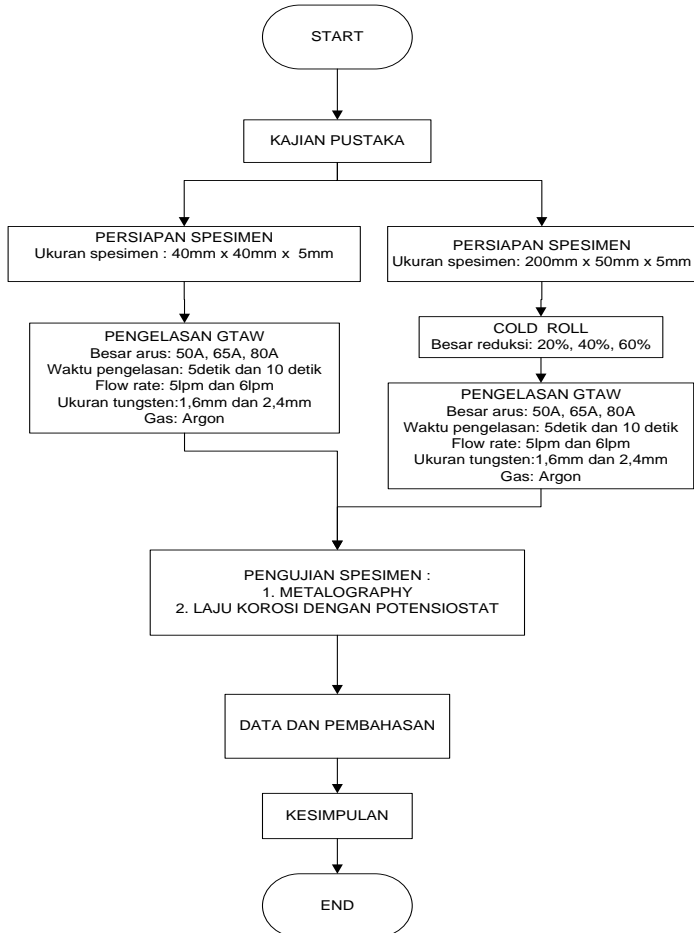
bertambahnya derajat deformasi. Hal ini diperkirakan sebagai akibat dari semakin stabilnya lapisan oksida pasif pada permukaannya sebagai akibat dari proses pengerjaan dingin yang dilakukan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan pada pengerjaan penelitian ini mengikuti diagram alir seperti tampak pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir proses penelitian

Untuk mempermudah memahami diagram alir proses penelitian dijelaskan sebagai berikut.

1. Melakukan kajian pustaka dengan mencari informasi-informasi tentang pengaruh pengerolan terhadap laju korosi pada proses pengelasan GTAW
2. Persiapan spesimen dilakukan untuk proses pengelasan dan pengerolan, yang digunakan yaitu *stainless steel 316 L* dengan dimensi awal yaitu 200mm x 50mm x 5mm.
3. Pengelasan GTAW yang dilakukan adalah las titik dengan menggunakan arus (50, 65, 80A) listrik DC dengan polaritas lurus dan menggunakan gas argon.
4. Pengerolan dingin dilakukan dengan cara pereduksian bertahap sekitar 0,1-0,5 mm setiap besar persentase pereduksian dan besar persentase yang digunakan adalah 20%, 40%, 60%.
5. Pengujian spesimen hasil las dan tanpa las, yaitu uji metalography, laju korosi, dan komposisi kimia untuk mengetahui bentuk mikrostruktur awal dan laju korosi sebelum dilakukan proses pengerolan dan pengelasan.

Melakukan uji dari *metalography* adalah sebagai berikut :

1. Lakukan langkah-langkah 1 – 3 pada spesimen.
2. *Grinding*, specimen dihaluskan kembali dengan mesin grinding dengan kekasaran dari kertas amplas sebesar 220 - 2000.
3. *Polishing*, specimen uji dipoles dengan *metal polishing* dan kain bludru hingga permukaan material yang dipoles mengkilap tanpa goresan.
4. Spesimen dietsa menggunakan asam oksalat ( $H_2C_2O_4$ ) dan air mineral (Aquades) 50 ml di aduk hingga homogen. Dengan durasi waktu pengetsaan selama 7 menit.
5. Spesimen diamati struktur mikro dan fasa yang terjadi menggunakan mikroskop optis dengan perbesaran 100X, 500X, dan 1000X.
6. Ulangi langkah 1 – 5 untuk setiap pesimen uji.

Tahapan pengujian Potensiostat, Pengujian dilakukan untuk mendapatkan data kerapatan arus ( $I_{corr}$ ) dan potensial ( $E_{corr}$ ). Pengujian laju korosi pada penelitian ini dilakukan pada permukaan yang terkena proses. Langkah-langkah sbb:

1. Menghaluskan permukaan material uji dengan kertas gosok dengan tingkat kekasaran 220, 400, dan 600. Hal ini berlaku untuk semua material yang akan diuji karena perlakuan yang dilakukan harus sama.
2. Data awal yang harus diketahui adalah densitas material, berat *equivalent*, luasan area yang akan diuji dan lama waktu pengujian. Data tersebut merupakan data yang dibutuhkan untuk menghitung laju korosi.
3. Material yang diuji disambung dengan kawat tembaga kemudian *dimounting* (resin) supaya pada saat pengujian hanya permukaan material yang bereaksi.
4. Rangkaian pengujian yaitu material uji sebagai elektoda kerja (Working Elektrode), elektoda pembantu (Counter Electrode), dan elektoda acuan dicelupkan pada larutan NaCl.
5. Melakukan pengujian mikrostruktur dan laju korosi kembali untuk mengetahui hasil yang diakibatkan oleh proses variasi pengerolan dan variasi pengelasan
6. Data dan Pembahasan.

### 3.2. Kajian Pustaka

Data yang di dapat pada penelitian terdahulu bertujuan sebagai acuan untuk proses penelitian dengan tujuan yang sama yaitu parameter yang digunakan saat pengelasan dan pengerolan terhadap laju korosi pada stainless steel austenitic. Data yang digunakan menggunakan variabel yang hampir sama.

### 3.3. Spesimen Uji

Material benda kerja yang akan diamati pada penelitian ini adalah stainless steel 316 L. Spesimen tersebut nantinya akan

digunakan sebagai spesimen uji laju korosi, pengelasan dan juga cold roll.

Komposisi kimia yang didapat setelah dilakukan pengujian spektro pada SS 316 L dapat dilihat pada Tabel 3.1:

Tabel 3.1 Komposisi kimia material

Sampel	Stainless steel	Komposisi Kimia (%)						
		C	Si	Mn	Ni	S	Cr	Mo
2.	316 L	0,0432-0,0435	0,410-0,414	0,969-1,03	11,6-12,4	0,0014-0,0020	16,7-17,4	2,05-2,24
	Average	0,0434	0,412	1	12	0,0017	17	2,14

Sumber: PT. BARATA INDONESIA

### 3.4 Proses *Grinding* dan *Polishing*

Proses *grinding* digunakan untuk menghaluskan atau meratakan permukaan spesimen yang nanti akan di celupkan ke larutan korosif dan untuk pengamatan struktur mikro. Proses ini berlangsung secara bertahap menggunakan kertas gosok dengan tingkat grid dari terkecil (220) ke grid yang besar (2000) dan dialiri air sampai permukaan spesimen tersebut halus.

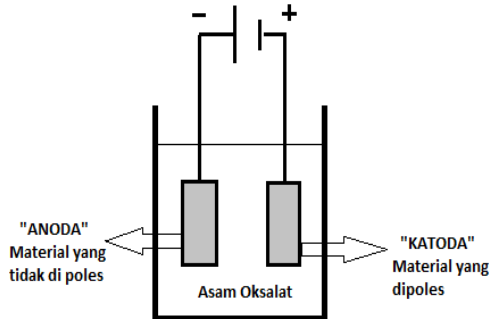
Sedangkan mesin *polishing* menggunakan kain wol yang ditaburi bubuk alumina atau *metal polishing* dan dialiri air sampai permukaan spesimen menjadi halus dan mengkilap.



Gambar 3.2 Mesin *Grinding* dan *Polishing*

### 3.5 Proses Etsa (*Etching*)

Proses etsa dilakukan dengan maksud untuk menkorosikan bagian permukaan spesimen sehingga mendapatkan struktur mikro spesimen. Pada proses etsa ini *etching reagent* yang digunakan adalah “asam oksalit” yang dilarutkan pada Aquades ( $H_2O$ ) dalam tabung reaksi.



Gambar 3.3 Proses Uji Etsa (*etching*)

### 3.6. Proses Pengamatan Struktur Mikro

Struktur mikro yang diamati dengan mikroskop optik adalah struktur mikro daerah yang terkena oleh panas hasil pengelasan, spesimen stainless steel 316L. Benda kerja pada pengamatan struktur mikro disiapkan dengan menghaluskan permukaan material dengan menggunakan kertas gosok dengan tingkat kekasaran 600, 800, 1200 yang kemudian dilanjutkan dengan proses poles.

Larutan etsa yang digunakan agar struktur mikro dapat diamati adalah campuran dari asam oksalat ( $H_2C_2O_4$ ) dan air mineral (Aquades) 50 ml di aduk hingga homogen untuk mengamati struktur mikro. Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4





Gambar 3.4 Mikroskop optik

Melakukan uji dari *metalography* adalah sebagai berikut :

1. Lakukan langkah-langkah 1 – 3 pada spesimen.
2. *Grinding*, specimen dihaluskan kembali dengan mesin grinding dengan kekasaran dari kertas amplas sebesar 200 - 2000.
3. *Polishing*, specimen uji dipoles dengan *metal polishing* dan kain bludru hingga permukaan material yang dipoles mengkilap tanpa goresan.
4. Spesimen dietsa menggunakan asam oksalat ( $H_2C_2O_4$ ) dan air mineral (Aquades) 50 ml di aduk hingga homogen. Dengan durasi waktu pengetsaan selama 5 menit.
5. Spesimen diamati struktur mikro dan fasa yang terjadi menggunakan mikroskop optis dengan perbesaran 100X, 500X, dan 1000X.
6. Ulangi langkah 1 – 5 untuk setiap pesimen uji.

### 3.7 Proses Pengerolan Dingin

Proses pengerolan dingin dilakukan untuk mereduksi ketebalan spesimen uji. Dimana spesimen akan direduksian sebesar 20%, 40%, 60%, yang selanjutnya akan dilakukan proses pengelasan GTAW untuk dilakukan pengujian laju korosi.



Gambar 3.5 Mesin Cold Roll

### 3.8 Proses Las GTAW

Proses pengelasan yang diawali dengan mengatur variabel pengelasan, dimana pada penelitian ini variabel yang digunakan adalah besar arus dan lama waktu pengelasan. Untuk besar arus yang digunakan yaitu 50, 65, 80A, sedangkan untuk waktu pengelasan yang digunakan yaitu 5 dan 10 detik. Pengaturan arus dilakukan melalui alat pengaturan yang sudah tersedia pada mesin, sedangkan untuk menentukan lama waktu pengelasan menggunakan *stopwatch*.



Gambar 3.6 Mesin Las GTAW

### 3.9 Proses Pengujian Laju Korosi

Pengujian laju korosi pada penelitian ini dilakukan pada permukaan yang telah dilakukan proses pengelasan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan potensiostat untuk mendapatkan data kerapatan arus ( $I_{cor}$ ) dan potensial ( $E_{cor}$ ). Data tersebut merupakan data yang dibutuhkan untuk menghitung laju korosi.

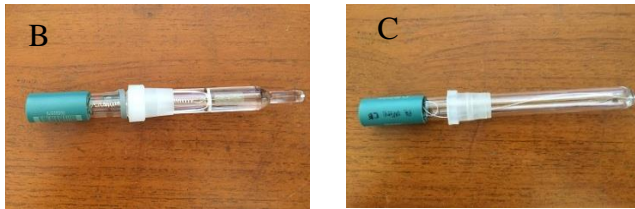
Data awal yang harus diketahui adalah densitas material, berat *equivalent*, luasan area yang akan diuji dan lama waktu pengujian. Material yang diuji sebagai elektoda kerja disambung dengan kawat tembaga kemudian *dimounting* dengan menggunakan resin supaya pada saat pengujian hanya permukaan material yang bereaksi. Setelah *dimounting* kemudian permukaan dihaluskan dengan kertas gosok dengan tingkat kekasaran 600, 800, 1200. Gambar 3.7 merupakan spesimen untuk pengujian laju korosi.



Gambar 3.7 Spesimen uji laju korosi

Pengujian laju korosi dilakukan dengan menggunakan sel tiga elektroda yang dilengkapi dengan perangkat *software* NOVA 1.8. Gambar 3.9 menunjukkan perangkat peralatan yang digunakan dalam pengujian laju korosi.





Gambar 3.8 (a) Alat uji potensiostat, (b) Elektroda Acuan, (c) Elektroda Pembantu (*Counter Electrode*)

Tahapan pengujian Potensiostat, Pengujian dilakukan untuk mendapatkan data kerapatan arus ( $I_{corr}$ ) dan potensial ( $E_{corr}$ ). Pengujian laju korosi pada penelitian ini dilakukan pada permukaan yang terkena proses. Langkah-langkah sbb:

1. Menghaluskan permukaan material uji dengan kertas gosok dengan tingkat kekasaran 600, 800, dan 1000. Hal ini berlaku untuk semua material yang akan diuji karena perlakuan yang dilakukan harus sama.
2. Data awal yang harus diketahui adalah densitas material, berat *equivalent*, luasan area yang akan diuji dan lama waktu pengujian. Data tersebut merupakan data yang dibutuhkan untuk menghitung laju korosi.
3. Material yang diuji disambung dengan kawat tembaga kemudian *dimounting* (resin) supaya pada saat pengujian hanya permukaan material yang bereaksi.
4. Rangkaian pengujian yaitu material uji sebagai elektroda kerja (Working Elektrode), elektroda pembantu (Counter Electrode), dan elektroda acuan dicelupkan pada larutan NaCl.
- 5.

### 3.10 Rancangan Eksperimen

Supaya mempermudah memahami variabel proses yang divariasikan pada penelitian ini dibuatlah rancangan eksperimen seperti pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Rancangan Eksperimen

Sample	Variabel proses			Variabel respon
	Reduksi Pengrollan	waktu las(s)	arus las(A)	Laju korosi (mm/year)
1	20%	5	50	
2			65	
3			80	
4		10	50	
5			65	
6			80	
1	40%	5	50	
2			65	
3			80	
4		10	50	
5			65	
6			80	
1	60%	5	50	
2			65	
3			80	
4		10	50	
5			65	
6			80	

## BAB 4

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah stainless steel 316L dengan tujuan utama penelitian ini untuk mengetahui pengaruh pengerolan dingin sebesar 20%, 40%, 60% dan parameter proses pengelasan GTAW, yaitu arus pengelasan dengan variasi arus 50A, 65A, dan 80A dan waktu pengelasan dengan variasi waktu 5 detik dan 10 detik terhadap respon laju korosi yang terjadi pada material *stainless steel* 316L.

Proses terjadinya korosi batas butir *stainless steel* 316L terjadi akibat adanya proses pengelasan yang dilakukan pada material. Korosi batas butir muncul pada saat mencapai temperature 500°C – 680°C. Terbentuknya presipitasi karbida chrom pada batas butir akan mengakibatkan daerah sekitar batas butir akan mengalami *depletion chrom*, atau miskin kromium yaitu kurang dari 12% sebagai syarat baja menjadi tahan terhadap korosi. Apabila baja tahan karat ini berada pada lingkungan korosif akan lebih meningkat lagi laju korosi yang terjadi dan akan mengakibatkan sifat mekanik dari baja tahan karat akan berkurang.

Penelitian ini dilakukan guna mengetahui proses pengaruh pengerolan dingin pda pengelasan GTAW terhadap pembentukan presipitasi karbida pada *stainless steel* 316L.

#### 4.1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian spektrometer dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia material yang nantinya akan digunakan untuk perhitungan *equivalent weight* yang akan digunakan untuk perhitungan laju korosi. Hasil komposisi kimia ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Komposisi kimia *stainless steel* 316L

Sampel	Stainless Steel	Komposisi Kimia (%)						
		C	Si	Mn	Ni	S	Cr	Mo
1.	316 L	0,0432- 0,0435	0,410- 0,414	0,969- 1,03	11,6- 12,4	0,0014- 0,0020	16,7- 17,4	2,05 – 2,24
	Average	<b>0,0434</b>	<b>0,412</b>	<b>1</b>	<b>12</b>	<b>0,0017</b>	<b>17</b>	<b>2,14</b>

## 4.2 Hasil Dari Pengerolan Dingin

Pengerolan dingin dilakukan untuk memodifikasi struktur mikro pada baja tahan karat 316L dari equiaxed grain menjadi elongated grain, yang mana jika dikombinasikan dengan proses pengerjaan panas dalam hal ini yaitu pengelasan akan menghasilkan struktur grain boundary yang lebih tahan terhadap korosi batas butir. Adapun hasil ukuran spesimen yang telah dilakukan pengerolan dingin pada tabel 4.1.

Tabel 4.2 Hasil pengerolan dingin baja tahan karat 316L.

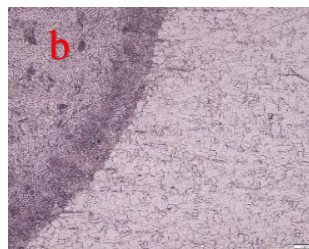
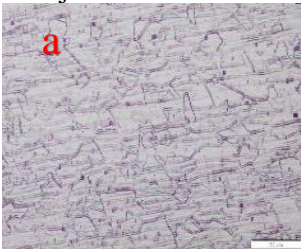
Ukuran Material Awal	Besar Persentase Reduksi	Ukuran Material Akhir
5 mm	20%	4,6 mm
5 mm	40%	3,75 mm
5 mm	60%	2,4 mm

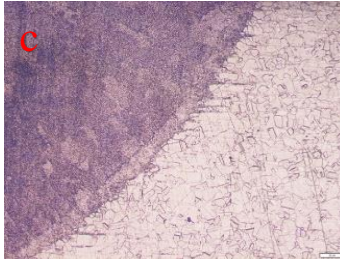
## 4.3 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik. Pengamatan struktur mikro dengan mikroskop optik bertujuan untuk melihat butiran pada spesimen *stainless steel* 316L yang telah dilakukan pengerolan dan pengelasan GTAW guna pembandingan dengan hasil pengujian hasil korosi.

### 4.3.1 Pengamatan Mikroskop Optik

Pengamatan struktur mikro dilakukan pada daerah HAZ. Hasil pengamatan menunjukkan batas butir mengalami penebalan karbida yang diakibatkan oleh terdifusinya khromium menuju batas butir yang diakibatkan oleh proses pengelasan GTAW yang menunjukkan bahwa material terserang korosi batas butir.

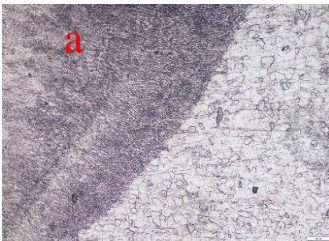




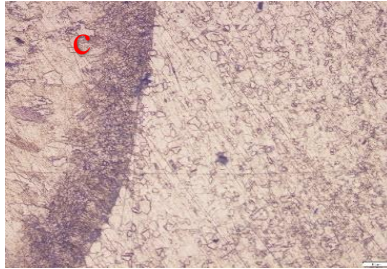
Gambar 4.1 Struktur mikro spesimen tanpa reduksi (a) struktur mikro sebelum pengelasan dan pengerolan (b) pengelasan dengan arus 50A selama 10detik (c) pengelasan dengan arus 80A selama 10 detik

Gambar 4.1 (a) merupakan struktur mikro awal material baja AISI 316L (b) merupakan struktur mikro saat dilakukan pengelasan dengan menggunakan arus sebesar 50A dengan waktu pengelasan selama 10 detik. Terlihat pada gambar (b) terjadi penebalan batas butir akibat difusi khrom yang cukup banyak. Sedangkan gambar 4.1 (c) terjadi penurunan penebalan pada batas butir. Dari kedua gambar tersebut terlihat semakin besar arus yang digunakan mengakibatkan penurunan penebalan karbida khrom pada batas butir untuk spesimen tanpa direduksi dengan pengerolan dingin.

Dan untuk struktur mikro setelah hasil pengerolan dengan reduksi 60% dan pengelasan dengan arus 50 amper, 65amper dan 80 amper dengan waktu pengelasan 10 detik ditunjukkan pada gambar 4.2 (a) dan (b).

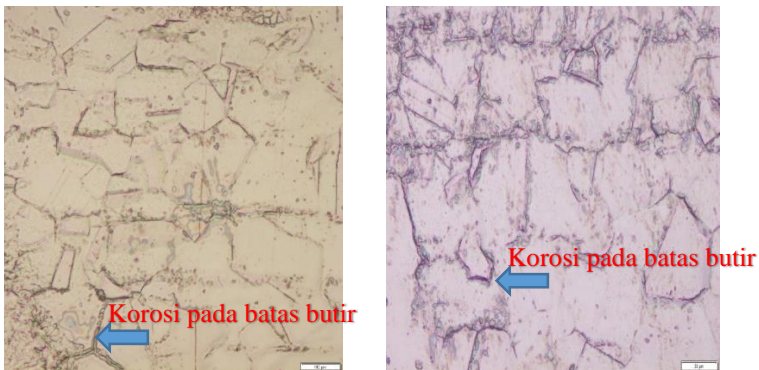




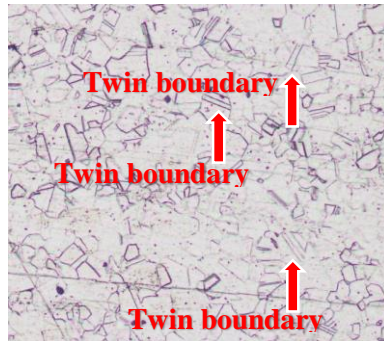


Gambar 4.2 Struktur mikro spesimen dengan reduksi 60%  
(a) pengelasan dengan arus 50A selama 10 detik (b) pengelasan dengan arus 65A selama 10 detik (c) pengelasan dengan arus 80A selama 10 detik

Setelah direduksi butiran sekitar HAZ yang sebelumnya berbentuk elongated grain sudah tidak tampak. Butiran yang tampak berupa equiaxed grain yang lebih besar dibanding material awalnya dikarenakan diakibatkan pengerolan dingin dan juga pengelasan.



Gambar 4.3 Struktur mikro terjadi korosi batas butir





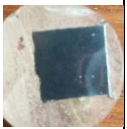



Gambar 4.4 Terjadi pembentukannya twin boundary

Pengerolan dingin merupakan salah satu proses saja untuk mendeformasi batas butir, jika proses tersebut dilanjutkan dengan perlakuan panas yakni dalam hal ini pengelasan maka akan dihasilkan suatu struktur batas butir *twinning*. Jadi dengan kata lain pengerolan dingin yang dilanjutkan oleh pengelasan bertujuan untuk menghasilkan *twinboundary* didalam struktur mikro. *Twin-boundary* merupakan suatu bagian kristal yang berubah orientasi membentuk kembaran simetris terhadap kisi semula. Bagian kristal *twinning* merupakan bayangan terbalik dari kristal induk akibat tegangan geser yang bekerja. Kristal daerah sebelah kanan tidak terbentuk. Sebelah kiri bidang ini, bidang atom mengalami geseran sedemikian rupa, sehingga membuat kisi bayangan sepanjang bidang *twinning*. Dalam kisi sederhana seperti ini, tiap atom dalam daerah *twinning* bergerak karena geseran homogeny sepanjang jarak yang sepadan dengan jaraknya dari bidang *twinning* [Dieter,1993]. *Twin-boundary* dapat mempengaruhi ketahanan korosi batas butir dikarenakan mempunyai energi batas (twin) yang sangat rendah, sehingga menahan keterikatan antara presipitasi karbida terhadap *twin-boundary* [Shimada, 2002]. Dan untuk hasil metalograpy lainnya terdapat pada lampiran B.

#### 4.4 Pengamatan Struktur Makro

Pembentukan derajat presipitasi karbida dilihat secara pengamatan makro ditunjukkan pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Pengamatan secara makro

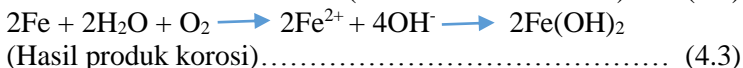
No .	Arus las/waktu las (Pengerolan)	Gambar Spesimen	No.	Arus las/waktu las (Pengerolan)	Gambar Spesimen
1.	80/10 Reduksi (60%)		4.	80/5 Reduksi (60%)	
2.	50/10 Reduksi (60%)		5.	50/5 Reduksi (60%)	
3.	65/10 Reduksi (60%)		6.	65/5 Reduksi (60%)	

Pada proses 80A/10s dan 80A/5s dengan reduksi 60% diketahui terbentuk *corona* yang lebih besar dibandingkan dengan yang lain. Untuk 50A/10s dan 50A/5s dengan reduksi 60%. Terlihat *corona* yang dihasilkan lebih tebal dibandingkan dengan arus 65A.. Terbentuk besar kecilnya *corona* diakibatkan dari *heat input* pengelasan yang diberikan. Jika *heat input* pengelasan semakin besar maka hasil *corona* yang dihasilkan juga akan semakin besar. Hanya saja pada pengelasan 65A terlihat hasil *corona* lebih tipis, kemungkinan besar diakibatkan jarak pengelasan yang dekat jika dibandingkan dengan 80A dan 50A.

#### 4.5 Laju Korosi

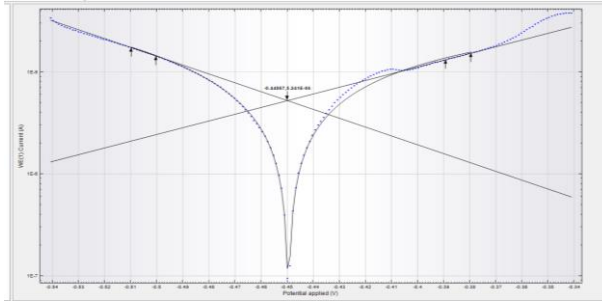
Pengujian korosi menggunakan potensiostat tiga elektroda dengan elektroda kerja yang dialiri oleh listrik. Aliran listrik ini bertujuan untuk mempercepat reaksi elektrokimia yang terjadi antara benda kerja dengan elektrolit. Metode yang digunakan pada pengujian korosi ini adalah dengan menggunakan metode ekstrapolasi tafel. Pada metode ini merupakan metode untuk mengukur laju korosi basah, dengan menarik garis lurus pada daerah linier kurva polarisasi katodik dan kurva polarisasi anodik sehingga kedua garis tersebut berpotongan pada satu titik, dimana titik tersebut merupakan potensial korosi atau  $E_{\text{corr}}$  dan arus korosi  $I_{\text{corr}}$ .

Korosi diakibatkan oleh reaksi redoks yang dihasilkan logam dengan larutan elektrolit. Pada penelitian ini larutan elektrolit yang digunakan adalah NaCl 3.5%. Pada larutan garam reaksi reduksi yang terjadi bukan merupakan pembentukan gas hidrogen dari ion hidrogen melainkan pembentukan gas hidrogen dan ion hidroksida dari penguraian air sehingga ekstrapolasi tafel katodik merupakan ekstrapolasi reaksi reduksi dari air. Sedangkan menurut (Fontana, 1987) reaksi oksidasi dan reduksi yang terjadi pada penggunaan air garam sebagai elektrolit adalah sebagai berikut:



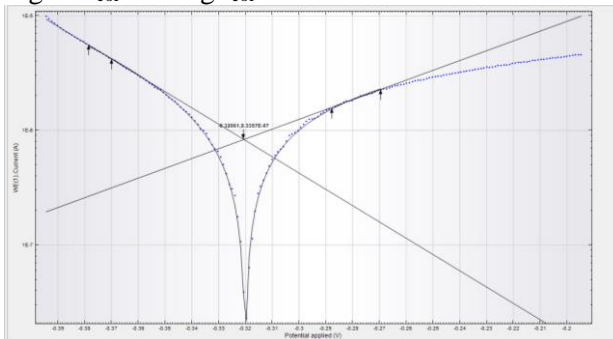
Gambar 4.5 menunjukkan kurva polarisasi hasil pengujian laju korosi pada baja AISI 316L. Kurva tersebut terbentuk dari kurva anodik dan kurva katodik. Kurva anodik terjadi ketika elektroda kerja dialiri oleh arus listrik kemudian unsur logam yang tadinya netral kemudian melepaskan elektron-elektron untuk membentuk ion-ion yang bersangkutan, seperti pada (Persamaan 4.1). Pada kurva katodik reaksi yang terjadi adalah penangkapan

elektron-elektron yang dilepaskan oleh reaksi anoda (Persamaan 4.2). Hasil pengujian menunjukkan  $I_{corr}$  pada *stainless steel* 316L dengan reduksi pengerolan dingin 60% dan arus pengelasan 80A serta waktu pengelasan 5 detik adalah  $46.456 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .



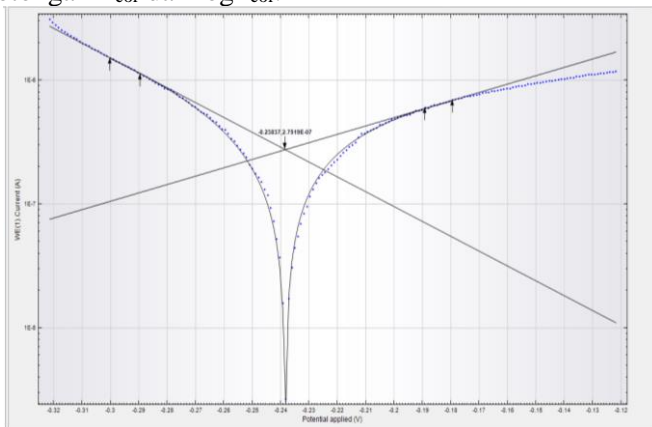
Gambar 4.5 Grafik Polarisasi Pengujian SS 316L reduksi 60% arus 80A waktu las 5 detik.

Kurva polarisasi pada pengujian  $I_{corr}$  *stainless steel* 316L dengan reduksi pengerolan dingin 40% dan arus pengelasan 80A serta waktu pengelasan 5 detik ditunjukkan pada Gambar 4.6. Hasil pengujian menunjukkan  $I_{corr}$  pada baja *stainless steel* 316L dengan reduksi pengerolan dingin 40% dan arus pengelasan 65A serta waktu pengelasan 5 detik  $1.6562 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Pada kurva polarisasi baja *stainless steel* 316L nilai  $I_{corr}$  ditentukan pada perpotongan  $E_{cor}$  dan  $\log I_{cor}$ .



Gambar 4.6 Grafik Polarisasi Pengujian Laju Korosi SS 316L reduksi 40% arus 65A waktu las 5 detik

Kurva polarisasi pada pengujian  $I_{corr}$  *stainless steel* 316L dengan reduksi pengerolan dingin 20% dan arus pengelasan 80A serta waktu pengelasan 5 detik ditunjukkan pada Gambar 4.7. Hasil pengujian menunjukkan laju korosi pada baja *stainless steel* 316L dengan reduksi pengerolan dingin 20% dan arus pengelasan 80A serta waktu pengelasan 5 detik  $0.63621 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Pada kurva polarisasi *stainless steel* 316L nilai laju korosi ditentukan pada perpotongan  $E_{cor}$  dan  $\log I_{cor}$ .



Gambar 4.7 Grafik Polarisasi Pengujian Laju Korosi SS 316L reduksi 20% arus 80A waktu las 5 detik

Untuk hasil pengujian dengan menggunakan potensiostat dengan *software* NOVA 1.8 dapat dilihat pada lampiran A.

#### 4.5.1 Perhitungan $I_{corr}$ Pada HAZ

Gambar 4.5 adalah contoh spesimen yang digunakan untuk pengujian laju korosi dengan menggunakan potensiostat. Pada gambar terlihat bagian weld metal, HAZ, dan logam induk. Pada pengujian potensiostat dengan spesimen tersebut didapatkan  $I_{corr}$  total yang ditunjukkan pada tabel 4.4.



Gambar 4.8 Spesimen Uji Korosi

Tabel 4.4 Hasil pengujian Icorr total pada spesimen.

Reduksi	Arus(A)/waktu las(s)	Icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
20%	50/5	0.186
	65/5	0.319
	80/5	0.636
	50/10	1.688
	65/10	2.935
	80/10	3.689
40%	50/5	0.150
	65/5	1.656
	80/5	0.346
	50/10	0.290
	65/10	0.713
	80/10	2.274
60%	50/5	2.354
	65/5	1.345
	80/5	6.456
	50/10	2.833
	65/10	2.735
	80/10	2.636

Tanpa Reduksi	50/5	11.515
	65/5	6.211
	80/5	1.327
	50/10	6.053
	65/10	6.211
	80/10	2.100

Sebagai upaya untuk mendapatkan hasil laju korosi yang tepat pada bagian HAZ, maka dilakukan pengukuran Icorr pada hasil weld metal dan pada logam induk dengan menggunakan potensiostat. Hasil dari pengukuran Icorr pada masing-masing weld metal dan logam induk ditunjukkan pada tabel 4.4 dan 4.5. Tabel 4.5 Hasil pengujian Icorr pada weld metal dengan potensiostat.

Arus(A)/waktu las(s)	Icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
50/5	2.587
65/5	1.055
80/5	7.707
50/10	5.870
65/10	1.055
80/10	2.128

Tabel 4.6 Hasil pengujian Icorr pada logam Induk dengan potensiostat.

Logam induk	Icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
20%	4.477
40%	0.149
60%	0.405
Tanpa reduksi	0.637



Setelah didapatkan Icorr pada weld metal dan logam induk, selanjutnya dilakukan perhitungan Icorr pada HAZ untuk masing-masing spesimen yang telah dilakukan pengerolan dingin dan pengelasan, dimana perhitungan Icorr HAZ adalah sebagai berikut:

$I_{corr\ HAZ} = I_{corr\ Total} - I_{corr\ Logam\ Induk} - I_{corr\ Wels\ Metal}$   
 Sehingga untuk hasil perhitungan Icorr HAZ ditunjukan pada tabel 4.7.

Tabel 4.7 Hasil perhitungan Icorr pada HAZ

Reduksi Pengrollan	Waktu Las(s)	Arus Las(A)	Icorr ( $\mu A/cm^2$ )
20%	5	50	6.878
		65	5.565
		80	11.548
	10	50	5.659
		65	2.597
		80	2.916
40%	5	50	2.586
		65	0.100
		80	7.510
	10	50	2.729
		65	0.491
		80	0.003
60%	5	50	0.638
		65	0.467
		80	38.344
	10	50	0.442
		65	1.275
		80	0.103
		50	8.291
		65	4.167
		80	7.016

Tanpa Reduksi	5		
	10	50	2.546
		65	0.827
		80	0.665

4.5.2 Perhitungan Laju Korosi Pada HAZ

Setelah didapatkan Icorr pada HAZ selanjutnya dilakukan perhitungan laju korosi pada HAZ dengan menggunakan persamaan 2.1 guna mengetahui seberapa cepat baja tahan karat 316L terkorosi diakibatkan oleh pengelasan.

$$CR = \frac{0.00327 I EW}{D} \dots\dots\dots (2.1)$$

- Dimana: CR = Laju korosi (mm/year)  
I = Kerapatan arus (μA/cm²)  
EW = Berat *equivalent* (gram/mol)  
D = Densitas material (gram/cm³)

D = 7.9 gram/cm³  
Untuk perhitungan EW dibutuhkan komposisi utama material antara lain:

Fe = 66,6%, Ni = 12%, Cr = 17%

$$N_{eq} = \sum \left( \frac{f^i \cdot n^i}{AW} \right)$$

= 0.666\*2/55.85 + 0.17\*3/52.01 + 0.12\*2/58.69  
= 0.03774

EW = 1/Neq  
= 1/0.03774  
= 26.493 gram/mol

Sehingga untuk laju korosi yang terjadi setelah dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan 2.1 ditunjukan pada tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil laju korosi

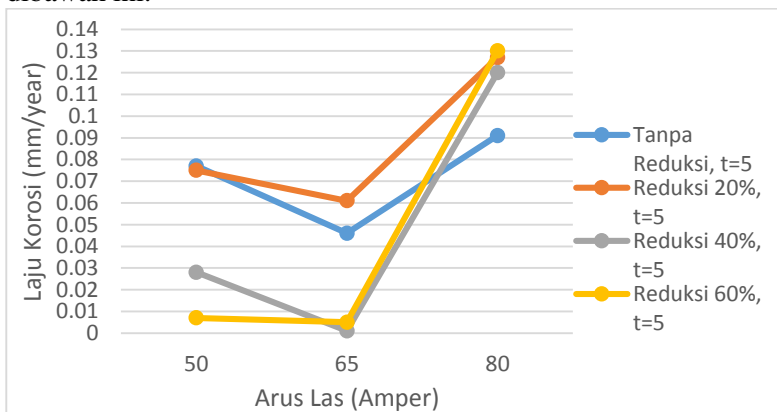
Reduksi Pengrollan	Waktu Las(s)	Arus Las(A)	Laju Korosi (mm/year)
20%	5	50	0.075
		65	0.061
		80	0.127
	10	50	0.032
		65	0.028
		80	0.09
40%	5	50	0.028
		65	0.001
		80	0.12
	10	50	0.001
		65	0.005
		80	0.065
60%	5	50	0.007
		65	0.005
		80	0.13
	10	50	0.001
		65	0.014
		80	0.063
Tanpa Reduksi	5	50	0.077
		65	0.046
		80	0.091
	10	50	0.007
		65	0.009
		80	0.03

#### 4.6 Pengaruh Pengerjaan Dingin (Cold Roll), Besar Arus Pengelasan, Lama waktu Pengelasan Terhadap Kerentanan Korosi Batas Butir SS 316L

Analisa yang digunakan untuk penelitian ini yaitu, menggunakan data laju korosi hasil uji potensiostat yang kemudian dikelompokkan berdasarkan kenaikan waktu pengelasan.

##### 4.6.1 Analisa Pengaruh Cold Roll Dengan Waktu Pengelasan 5 detik.

Data laju korosi pada material stainless steel yang telah mengalami pengerolan dingin dengan reduksi area sebesar 20%, 40%, 60% kemudian dilakukan pengelasan dengan besar arus 50A, 65A, 80A dengan waktu pengelasan 5 detik tampak pada gambar dibawah ini.



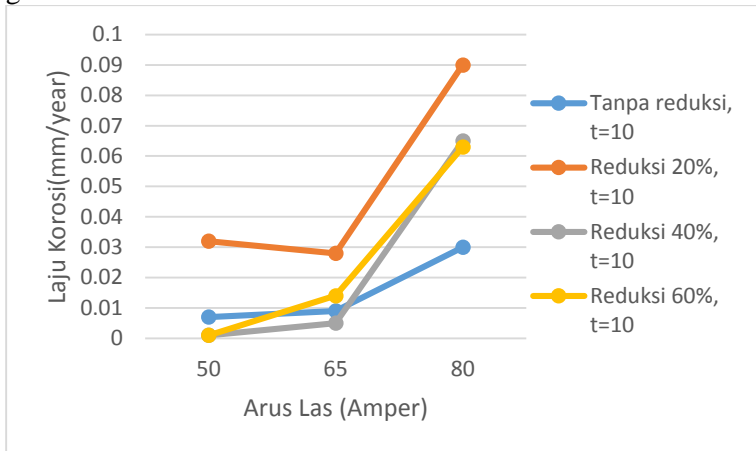
Gambar 4.9 Efek variasi arus pengelasan terhadap laju korosi material yang mengalami reduksi 20%, 40%, 80% dengan waktu pengelasan 5 detik.

Tampak bahwa dengan waktu pengelasan 5 detik terlihat laju korosi terendah yaitu pada reduksi 40% saat arus pengelasan 65A, sedangkan laju korosi tertinggi yaitu pada material dengan reduksi area 60% dengan arus pengelasan 80A. Ketika pengelasan dengan arus 80A, laju korosi lebih tinggi dibandingkan dengan arus

pengelasan 50A. Hal ini sesuai dengan foto pada pengamatan makro yang mana pembentukan corona lebih luas pada saat pengelasan 80A.

#### 4.6.2 Analisa Pengaruh Cold Roll Dengan Waktu Pengelasan 10 detik.

Data laju korosi pada material stainless steel yang telah mengalami pengerolan dingin dengan reduksi area sebesar 20%, 40%, 60% kemudian dilakukan pengelasan dengan besar arus 50A, 65A, 80A dengan waktu pengelasan 10 detik tampak pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.10 Efek variasi arus pengelasan terhadap laju korosi material yang mengalami reduksi 20%, 40%, 80% dengan waktu pengelasan 10 detik.

Tampak bahwa dengan waktu pengelasan 5 detik terlihat laju korosi terendah yaitu pada reduksi 40% dan 60% dengan arus pengelasan 50A, sedangkan laju korosi tertinggi yaitu pada material dengan reduksi area 20% dengan arus pengelasan 80A. Pada grafik ini menjelaskan semakin tinggi arus pengelasan yang digunakan maka laju korosi semakin meningkat.

#### 4.7 Pengujian Statistik

Pengujian statistik untuk mengetahui pengaruh pengerolan dingin, waktu pengelasan, dan besar arus pengelasan serta interaksi ketiganya terhadap Icorr pada *stainless steel* 316L berdasarkan anova faktorial dengan menggunakan *software statistic*.

Tabl 4.9 *Between subjects factors*

Between-Subjects Factors		N
A	50	24
	65	24
	80	24
%	0	18
	20	18
	40	18
	60	18
s	5	36
	10	36

Tabel 4.10 *Test of between-subjects effect*

Dependent Variable: mm/year

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	,256 <sup>a</sup>	24	,011	768694,000	,000
Arus	,052	2	,026	1879807,000	,000
Reduksi	,019	3	,006	447788,000	,000
Waktu	,017	1	,017	1188100,000	,000
Arus * Reduksi	,013	6	,002	151151,000	,000
Arus * Waktu	,002	2	,001	84619,000	,000
Reduksi * Waktu	,006	3	,002	139468,000	,000
Arus * Reduksi * Waktu	,005	6	,001	64099,000	,000
Error	6,667E-7	48	1,389E-8		
Total	,256	72			

a. R Squared = 1,000 (Adjusted R Squared = 1,000)

#### Output

#### Hipotesis Pengaruh Perubahan Arus Las

Ho : Tidak ada pengaruh perubahan arus

H1: Minimal ada sepasang arus berpengaruh

Karena  $p = 0,000 < \alpha = 0,05$  Ho ditolak

Kesimpulan : Minimal ada sepasang arus yang berpengaruh .

### **Hipotesis Pengaruh Perubahan Waktu**

Ho : Tidak ada pengaruh perubahan Waktu

H1: Minimal ada sepasang Waktu yang berpengaruh

Karena  $p = 0,000 < \alpha = 0,05$  Ho ditolak

Kesimpulan : Minimal ada sepasang Waktu yang berpengaruh .

### **Hipotesis Pengaruh Perubahan Reduksi**

Ho : Tidak ada pengaruh perubahan reduksi

H1: Minimal ada sepasang reduksi yang berpengaruh

Karena  $p = 0,000 < \alpha = 0,05$  Ho ditolak

Kesimpulan : Minimal ada sepasang Waktu yang berpengaruh .

### **Hipotesis Interaksi antara Arus\*Reduksi**

Ho : Tidak ada pengaruh Interaksi antara arus\*reduksi

H1: Minimal ada sepasang Interaksi antara arus\*reduksi yang berpengaruh

Karena  $p = 0,000 > \alpha = 0,05$  H<sub>1</sub> diterima

Kesimpulan : Minimal ada sepasang pengaruh interaksi antara arus\*reduksi.

### **Hipotesis Interaksi antara Arus\*Waktu**

Ho : Tidak ada pengaruh Interaksi antara arus\*waktu

H1: Minimal ada sepasang Interaksi antara arus\*waktu yang berpengaruh

Karena  $p = 0,000 > \alpha = 0,05$  H<sub>1</sub> diterima

Kesimpulan : Minimal ada sepasang pengaruh interaksi antara arus\*waktu.

### **Hipotesis Interaksi antara Reduksi\*Waktu**

Ho : Tidak ada pengaruh Interaksi antara reduksi\*waktu

H1: Minimal ada sepasang Interaksi antara reduksi\*waktu yang berpengaruh

Karena  $p = 0,000 > \alpha = 0,05$   $H_1$  diterima

Kesimpulan : Minimal ada sepasang pengaruh interaksi antara reduksi\*waktu .

### Hipotesis Interaksi antara Arus\*Reduksi\*Waktu

$H_0$  : Tidak ada pengaruh Interaksi antara arus\*reduksi\*waktu

$H_1$ : Minimal ada sepasang Interaksi antara arus\*reduksi\*waktu yang berpengaruh

Karena  $p = 0,000 > \alpha = 0,05$   $H_1$  diterima

Kesimpulan : Minimal ada sepasang pengaruh interaksi antara arus\*reduksi\*waktu.

Untuk mencari pasangan arus dan reduksi yang berpengaruh dilanjutkan dengan uji perbandingan ganda dengan Duncan.

Tabel 4.11 Hasil Tes terhadap pengaruh arus pengelasan

**A**

### Homogeneous Subsets

mm/year

Duncan<sup>a,b</sup>

A	N	Subset		
		1	2	3
65	24	,02113	,03021	,08225
50	24			
80	24			
Sig.		1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1,389E-8.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 24,000.

b. Alpha = 0,05.

Kesimpulan:

1. Besar arus berpengaruh terhadap Icorr, terdapat 3 kelompok data laju korosi.



2. Kelompok data arus 65A menghasilkan laju korosi terendah.
3. Kelompok data arus 80A menghasilkan laju korosi tertinggi

Tabel 4.12 Hasil Tes Terhadap Pengaruh Reduksi Pengerolan

%

### Homogeneous Subsets

mm/year

Duncan<sup>a,b</sup>

%	N	Subset			
		1	2	3	4
40	18	,02750	,03667	,04328	,07067
60	18				
0	18				
20	18				
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1,389E-8.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 18,000.

b. Alpha = 0,05.

### Kesimpulan:

1. Besar reduksi berpengaruh terhadap Icorr, terdapat 4 kelompok data laju korosi.
2. Kelompok data dengan reduksi 20% menghasilkan laju korosi paling tinggi.
5. Kelompok data dengan reduksi 40% menghasilkan laju korosi terendah.
3. Kelompok data dengan reduksi 0% menghasilkan laju korosi tertinggi ke dua.
4. Kelompok data dengan reduksi 60% menghasilkan laju korosi tertinggi ke tiga.

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat dibuat kesimpulan sebagai berikut:

1. Adanya variasi pengerolan dingin, variasi arus dan waktu pengelasan mengakibatkan perubahan struktur mikro baja tahan karat 316L. Pada penelitian ini akibat dari kombinasi pengerolan dingin dan input panas dari pengelasan menyebabkan terbentuknya *twin boundary* yang menyebabkan ketahanan korosi menjadi meningkat.
2. Dilihat dari hasil pengujian Icorr dengan menggunakan potensiostat didapatkan laju korosi terendah saat pengelasan 5 detik terjadi sewaktu pengerolan dingin dilakukan reduksi sebesar 40% dengan pengelasan menggunakan arus sebesar 65 ampere yaitu 0,001 mm/year, sedangkan laju korosi terendah saat pengelasan 10 detik didapatkan saat pengerolan dingin dilakukan sebesar 40% dan 60% dengan pengelasan menggunakan arus sebesar 50 ampere yaitu sebesar 0,001 mm/year.
3. Dari hasil uji statistik menyatakan bahwa untuk variasi reduksi dan juga variasi arus pengelasan, sangat signifikan berpengaruh terhadap laju korosi pada stainless steel 316L.

#### **5.2 Saran**

Supaya hasil penelitian tentang fenomena yang terjadi pada korosi intergranular bisa lebih lengkap, maka saran untuk peneliti selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya sebaiknya lebih fokus pada variasi tertentu seperti arus yang digunakan, waktu pengelasan dan juga ditambah dengan variasi jarak pengelasan.
2. Sebaiknya penelitian ini juga ditunjang dengan data uji kekerasan material sehingga kita dapat mengelompokkan dalam penggunaannya.

3. Dan juga sebaiknya menggunakan alat bantu untuk mengatur jarak pengelasan supaya konstan, agar data lebih baik

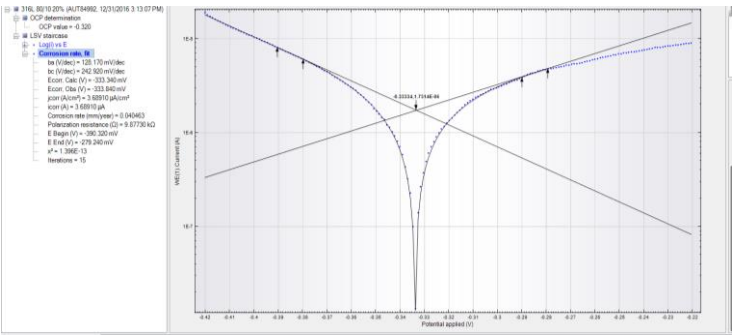
## DAFTAR PUSTAKA

- Ainur Ridho, Setiawati (2007). "*Pengaruh Pengerolan Dingin Dan Temperatur Annealing Terhadap Ketahanan Korosi Integranular Pada Austenitic Stainless Steel Tipe 304*". Tugas Akhir. Surabaya : ITS.
- Fontana, Mars. G, (1987). "*Corrosion Engineering*". New York: Mc Graw – Hill Book Company.
- Kou, Sindo (2003). "*Welding Metallurgy*". Second Edition. A Wiley-Interscience publication.
- Nugraha, Andi (2007) "*Pengaruh Pengerolan Dingin Terhadap Ketahanan Korosi Stainless Steel 316 L Sebagai Material Implan Medis Tugas Akhir*". Bandung : ITB.
- Oxtoviandrew Picarima, Gerald (2005). "*Pengaruh arus, kecepatan las dan jarak penyemprotan media pendingin terhadap pembentukan presipitasi karbida krom pada SS 304 dengan pengelasan GTAW*".
- Trethewey, K.R., (1991), Korosi untuk mahasiswa dan rekayasawan, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Salvago, G., Fumagalli, G., & Sinigaglia, G. (1983). "*The Corrosion Behavior Of AISI 304L Stainless Steel In 0.1 M HCL At Room Temperature-II. The Effect Of Cold Working*". Italy. 23, (5), 515-523.

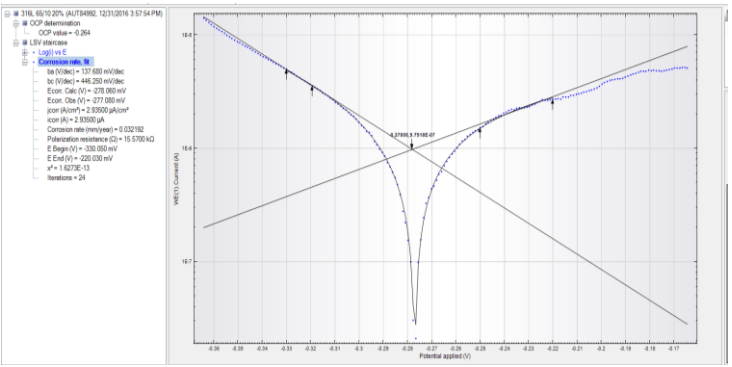
- Shimada, M., Kokawa, H., Wang, Z.J., Sato, Y.S., Karibe, I (2002). *“Optimization of grain boundary character distribution for intergranular corrosion resistant 304 stainless steel by twin-induced grain boundary engineering”*. Japan.
- Suwarno (2007). *“Investigasi Derajat Presipitasi Karbida Krom pada Baja Tahan Karat Austenitik dengan Pengamatan Makro”*. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Mesin FTI, ITS Surabaya.
- W. Giachino, Joseph., Weeks, Williams (1960-1971). *“Welding Skills and Practice”*. Western Michigan University.
- Wiryosumarto, Harsono., Okumura, Toshie (1996). *“Teknologi Pengelasan Logam”*. Pradnya Paramita : Jakarta.
- Zheng, Z.J., Gao, Y., Gui, Y., & Zhu, M. (2012). *“Corrosion behavior of nanocrystalline 304 stainless steel prepared by equal channel angular pressing”*. China. (54), 60-67.
- E. Dieter, George (1993) *“Metalurgi Mekanik”*. Edisi Ketiga. University of Maryland.

# Lampiran A

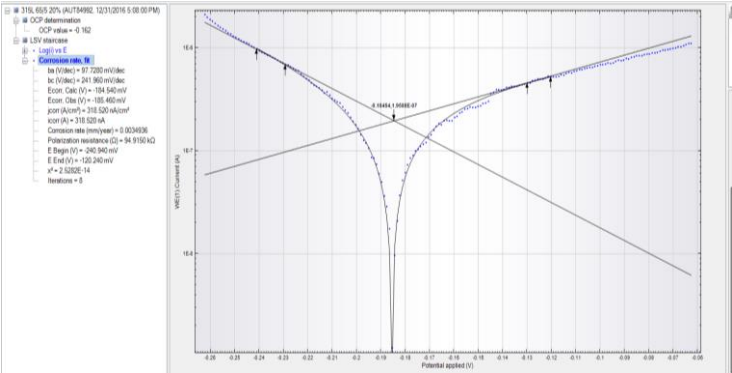
## 8A0/10s 20%



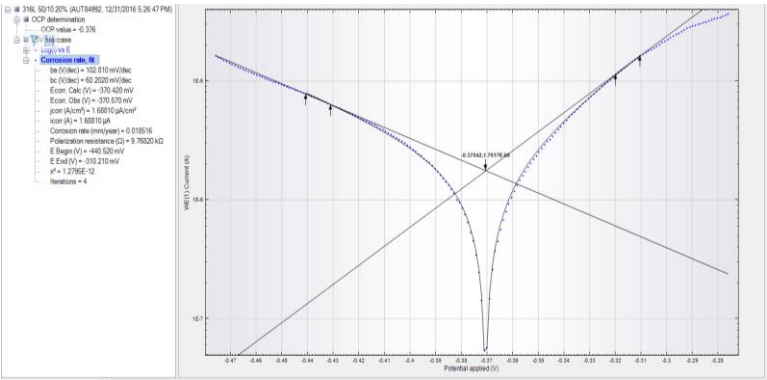
## 65A/10s 20%



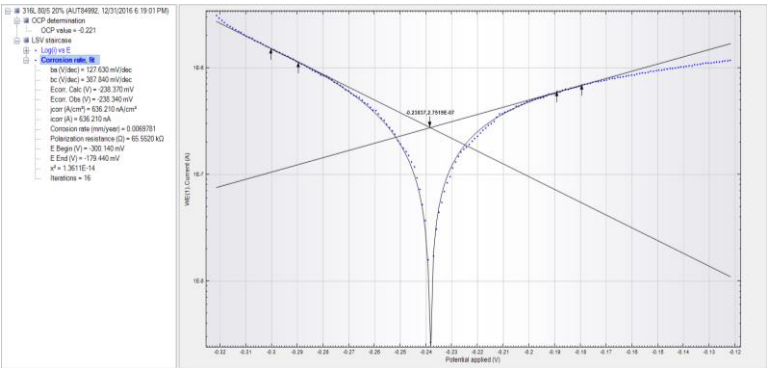
## 65A/5s 20%



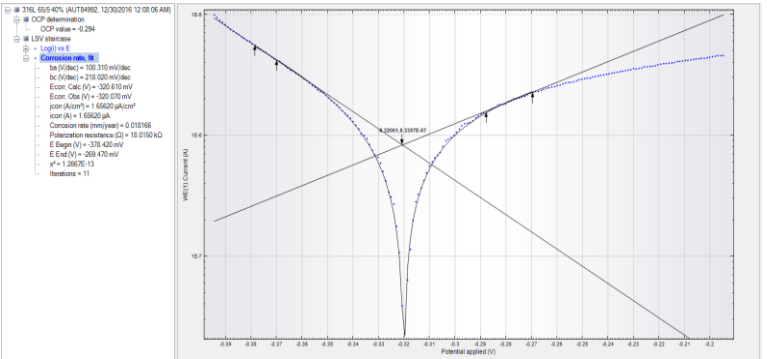
50A/10s 20%



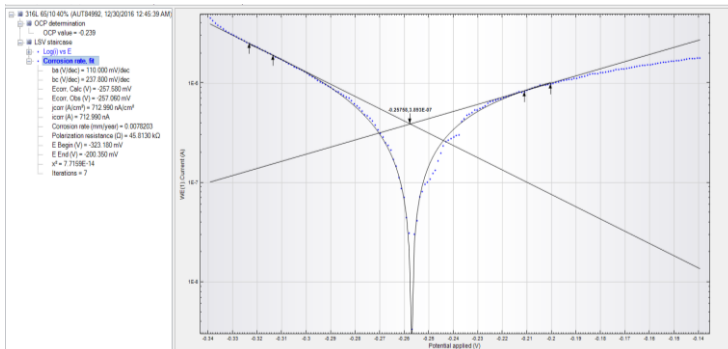
80A/5s 20%



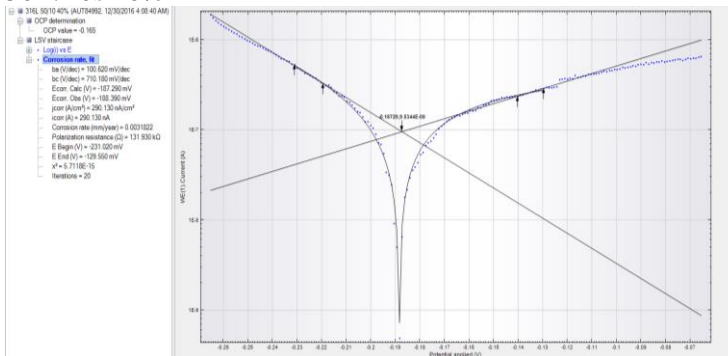
65A/5s 40%



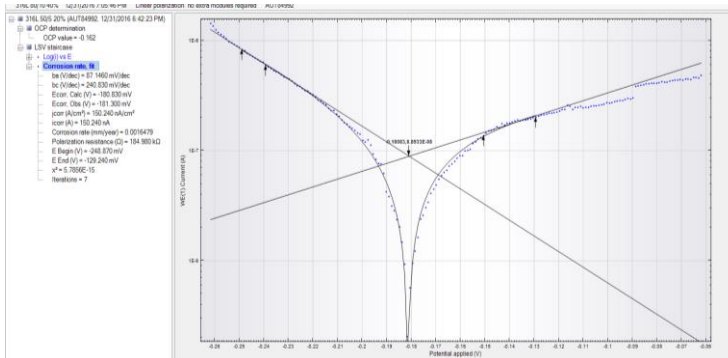
## 65A/10s 40%



## 50A/10s 40%

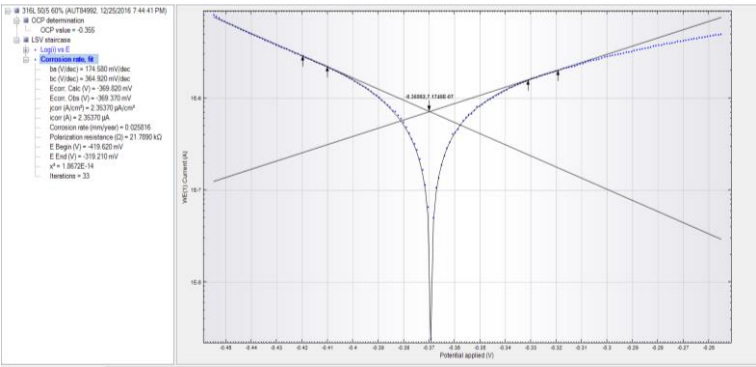


## 50A/5s 40%

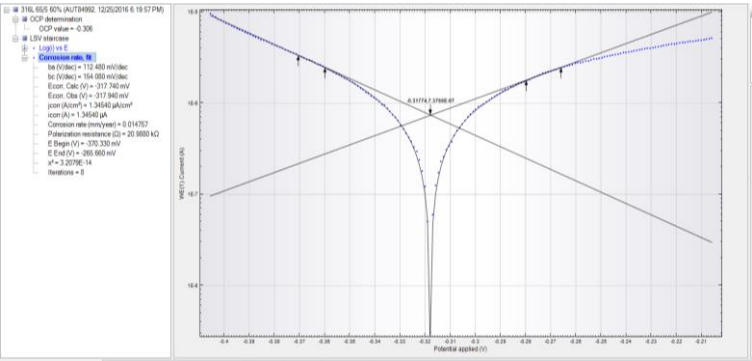




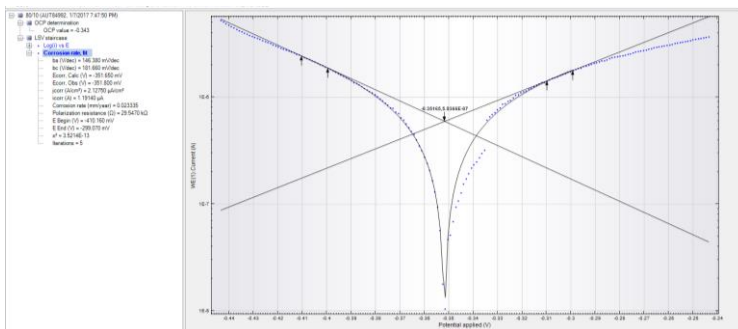
50A/5s 60%



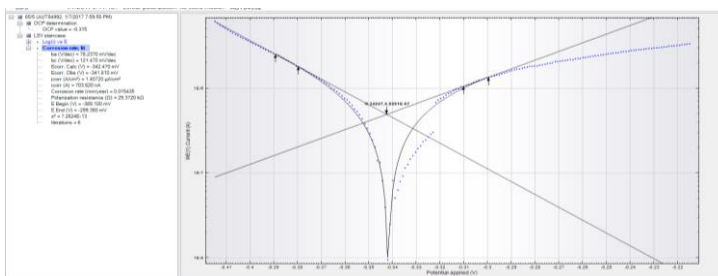
65A/5s 60%



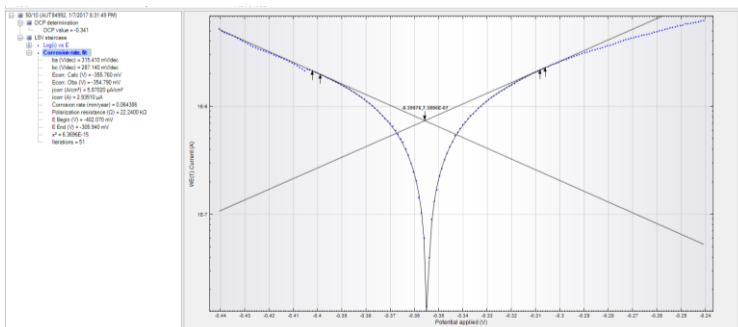
80A/10s



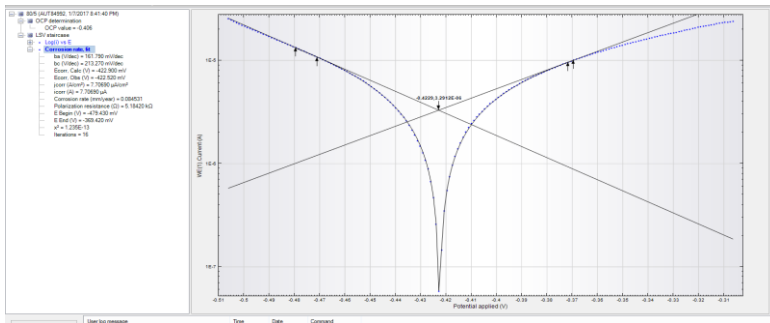
65A/5s



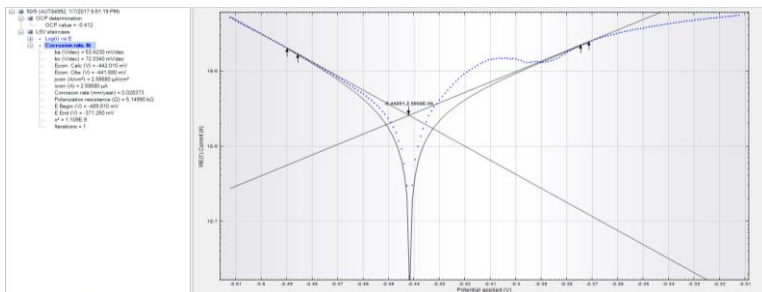
50A/10s



80A/5s



50A/5s



[illegible]

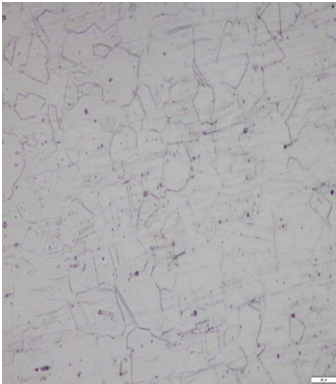
[X] ZPL (STARTED: 1/7/2011 10:22 PM)  
 [X] OCP measurement  
 [X] OCP value = 0.379  
 [X] LSV increase  
 [X] - limit = 0  
 [X] Corrosion site, 0  
 [X] An Cath = 100.260 mV/sec  
 [X] An Cath (V) = -398.360 mV  
 [X] Elec Obs (V) = -398.360 mV  
 [X] scan (A) = 4.4777E-05  
 [X] scan (A) = 4.4777E-05  
 [X] Corrosion rate (mm/year) = 0.00113  
 [X] Polarization resistance (Ω) = 1.4470E+02  
 [X] E (V) = -440.370 mV  
 [X] E (V) = -398.360 mV  
 [X] n\* = 1.4710E-1  
 [X] Iterations = 7

ANODE Current (A)  
 Potential (V)  
 -0.393V, 2.11E-05

@ 40°C (AUT4992, 1/20/17 9:30:37 PM)  
 @ OCP determination  
 OCP value = -0.173  
 @ LSV staircase  
 (1) = Log10 iE  
 @ Corrosion rate, 10  
 the V(Rev) = 125.470 mV/sec  
 the V(Fwd) = 276.850 mV/sec  
 Ecorr Obs (V) = -174.230 mV  
 Ecorr Obs (V) = -174.830 mV  
 jcorr (A/cm²) = 140.070 uA/cm²  
 jcorr (A) = 2.5000 uA  
 Corrosion rate (mm/year) = 0.00163  
 Polarization resistance (Ω) = 464.530 kΩ  
 E Ragn (V) = -249.180 mV  
 E End CV = -158.200 mV  
 n\* = 1.9118E+05  
 Redoxes = 11

## Lampiran B

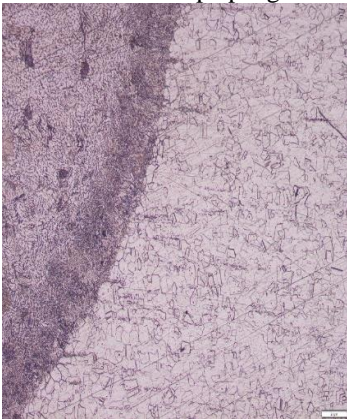
Bentuk butir awal



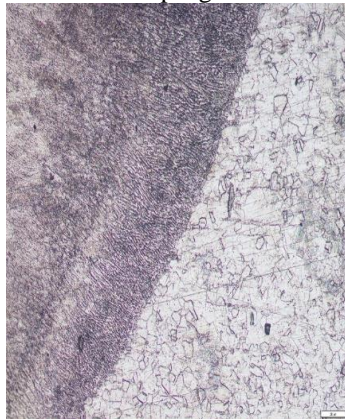
80A t=10 detik tanpa pengerolan



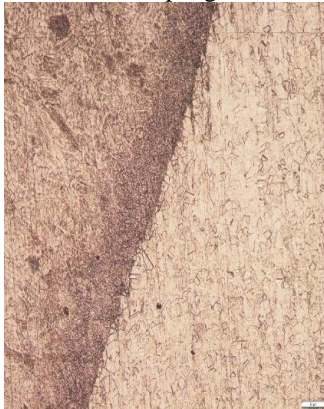
50A t=10detik tanpa pengerolan



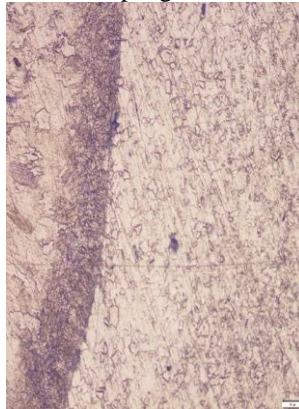
50A t=10 detik pengerolan 60%



65A t=10detik pengerolan 60%



80A t=10 pengerolan 60%



50A t=5 detik pengerolan 60%

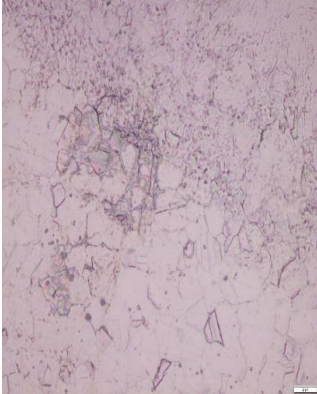


65A t=5 pengerolan 60%

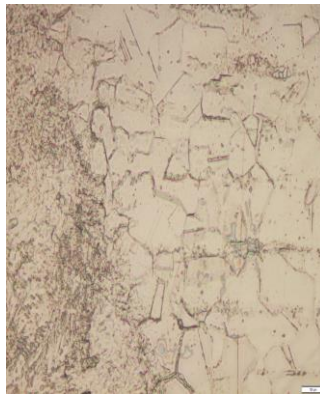




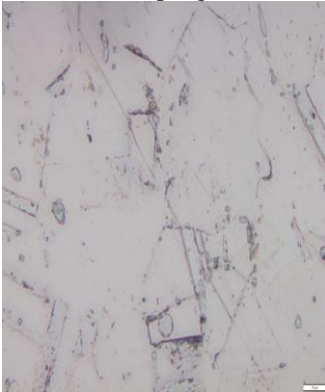
80A t=5 pengerolan 60%



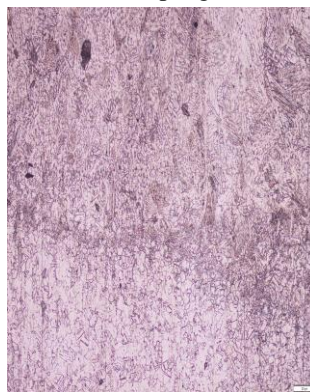
50A t=5 detik pengerolan 20%



50A t=5 detik pengerolan 40%

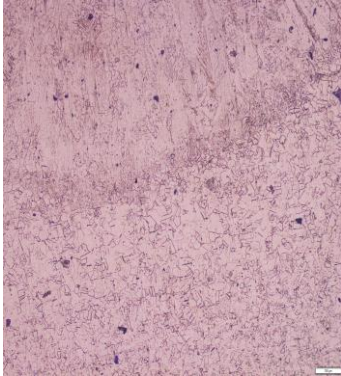


80A t=5 detik pengerolan 40%

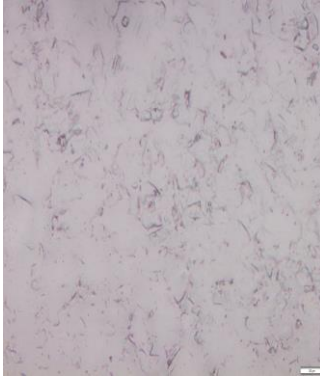




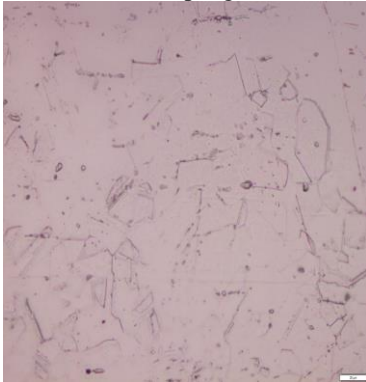
80A t=5 detik pengerolan 20%



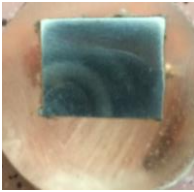
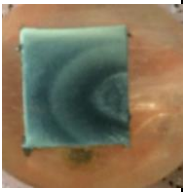
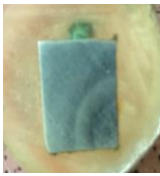

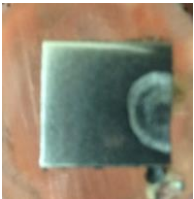
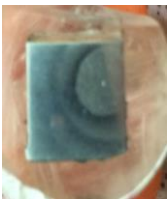


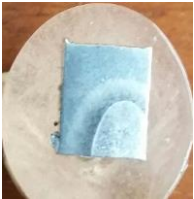


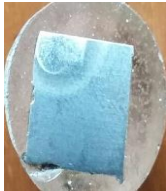
65A t= 10 detik pengerolan 60%



65A t=10 detik pengerolan 40%



## Lampiran C

50A 5 detik 20%	80A 5 detik 20%	65A 10 detik 60%	65A 10 detik 40%
			
50A 5 detik 40%	80A 5 detik 40%	50A 10 detik 20%	80A 10 detik 20%
			
50A 10 detik 60%	80A 10 detik 60%	50A 5 detik 60%	50A 10 detik tanpa pengerolan
			



**harata indonesia**  
PT. (PERSERO)

**UNIT FOUNDRY GREKIK**

**Chemical Results**

Sample No : B 316 L

Customer :

Furnace :

Name of Equipment :

Heat No :

Order No :

Lab. No : 06102016100

Material :

**Spektralanalyzer Foundry-MASTER**

**Grade :**

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Ce	Mo	Ni
1	67,4	0,0432	0,410	0,969	0,0415	0,0014	16,7	2,05	11,6
2	65,7	0,0435	0,414	1,03	0,0375	0,0020	17,4	2,24	12,4
Ave	66,6	0,0434	0,412	1,00	0,0395	0,0017	17,0	2,14	12,0

	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn
1	0,0184	0,202	0,102	0,0860	0,0157	0,105	0,0343	< 0,0025	0,0071
2	0,0188	0,209	0,103	0,0622	0,0059	0,105	0,0374	< 0,0025	0,0055
Ave	0,0186	0,206	0,102	0,0741	0,0108	0,105	0,0359	< 0,0025	0,0063

**Lampiran D**



## **BIODATA PENULIS**



Penulis dilahirkan di Serang 16 Maret 1993, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Selama ini penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SDN 1 Ciegen, SMPN 5 Cilegon, SMK Yayasan Pendidikan Krakatau Steel Cilegon. Setelah lulus dari SMK pada tahun 2011, penulis melanjutkan studi ke perguruan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada Fakultas

Teknologi Industri, Program Studi D3 Teknik Mesin dan lulus pada September 2014. Pada September 2014, penulis melanjutkan studi Program Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Mesin dan terdaftar dengan NRP. 2114105025 Teknik Mesin. Penulis tertarik pada bidang studi Metalurgi khususnya pada korosi, oleh karena itu penulis mendedikasikan Tugas Akhir pada bidang korosir agar bermanfaat bagi masyarakat khususnya bagi diri sendiri. Dan penulis akan selalu berusaha supaya ilmu yang telah diperoleh dapat bermanfaat.

E-mail : [bro.g3099@gmail.com](mailto:bro.g3099@gmail.com)